



**Casa abierta al tiempo**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
METROPOLITANA  
UNIDAD AZCAPOTZALCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

**ESTIMACIÓN EN EL INTERVALO DE COMPORTAMIENTO  
ELÁSTICO DE LOS DESPLAZAMIENTOS LATERALES DE  
MUROS CON ABERTURAS MEDIANTE MÉTODOS  
SIMPLIFICADOS**

**T E S I S**

PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**

P R E S E N T A:

**ING. ANGEL EDUARDO LIGA PAREDES**

ASESOR DE TESIS:

**DR. ARTURO TENA COLUNGA**

CIUDAD DE MÉXICO, JULIO DE 2017

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE CONTENIDO.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
OBJETIVOS GENERALES.....	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
<b>CAPÍTULO 1.    ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>5</b>
1.1.    MÉTODOS ANALÍTICOS PROPUESTOS PARA DETERMINAR DESPLAZAMIENTOS LATERALES DE MUROS CON ABERTURAS EN EL INTERVALO DE COMPORTAMIENTO ELÁSTICO .....	5
1.1.1. <i>Método de Coull y Choudhury</i> .....	5
1.1.2. <i>Método del marco equivalente</i> .....	6
1.1.3. <i>Método del elemento finito</i> .....	10
1.1.4. <i>Comparación de algunos métodos simplificados con elementos finitos</i> .....	13
1.2.    INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES DE MUROS CON ABERTURAS ANTE CARGAS LATERALES .....	16
<b>CAPÍTULO 2.    MUROS CON UNA SOLA ABERTURA .....</b>	<b>21</b>
2.1.    ESTIMACIONES CON ELEMENTOS FINITOS .....	23
2.2.    APROXIMACIONES OBTENIDAS CON MÉTODOS SIMPLIFICADOS .....	27
2.3.    ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	29
2.3.1. <i>Muros simétricos</i> .....	29
2.3.2. <i>Muros asimétricos</i> .....	36
<b>CAPÍTULO 3.    MUROS CON MÚLTIPLES ABERTURAS .....</b>	<b>51</b>
3.1.    ESTIMACIONES CON ELEMENTOS FINITOS .....	51
3.2.    PROPUESTAS PARA ESTIMAR ABERTURAS EQUIVALENTES.....	53
3.3.    APROXIMACIONES OBTENIDAS CON MÉTODOS SIMPLIFICADOS EMPLEANDO LAS PROPUESTAS DE LAS ABERTURAS EQUIVALENTES .....	57
3.4.    ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	58
3.4.1. <i>Muros simétricos</i> .....	58
3.4.2. <i>Muros asimétricos</i> .....	65
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>73</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>76</b>
<b>APÉNDICE A.    MODELOS DE MUROS CON UNA FILA DE ABERTURAS .....</b>	<b>78</b>
A.1.    MUROS SIMÉTRICOS .....	78
A.2.    MUROS ASIMÉTRICOS .....	79
<b>APÉNDICE B.    MODELOS DE MUROS CON MÚLTIPLES ABERTURAS.....</b>	<b>81</b>
B.1.    MUROS SIMÉTRICOS RM1 .....	81
B.2.    MUROS ASIMÉTRICOS RM3 .....	82
<b>APÉNDICE C.    DEFINICIÓN DE ELEMENTOS EQUIVALENTES (EJEMPLO).....</b>	<b>83</b>
<b>APÉNDICE D.    CÁLCULO DE ABERTURAS EQUIVALENTES .....</b>	<b>84</b>
D.1.    MURO SIMÉTRICO RM1.....	84
D.1.1. <i>Propuesta de Rivera (2006)</i> .....	84
D.1.2. <i>Propuesta nueva</i> .....	85
D.2.    MURO ASIMÉTRICO RM3 .....	86

D.2.1.	<i>Propuesta de Rivera (2006)</i> .....	87
D.2.2.	<i>Propuesta nueva</i> .....	88

**APÉNDICE E. CURVAS DE RESULTADOS DE MUROS CON UNA SOLA FILA DE ABERTURAS ..... 90**

E.1.	SIMÉTRICOS.....	90
E.2.	ASIMÉTRICOS.....	99
E.2.1.	<i>Muros con abertura excéntrica del 40%</i> .....	99
E.2.2.	<i>Muros con abertura excéntrica del 82%</i> .....	108

**APÉNDICE F. CURVAS DE RESULTADOS DE MUROS CON MÚLTIPLES ABERTURAS..... 118**

F.1.	SIMÉTRICOS RM1.....	118
F.2.	ASIMÉTRICOS RM3.....	127

# INTRODUCCIÓN

---

Los muros son elementos que se caracterizan por aportar rigidez y resistencia lateral al sistema y, con ello, reducen los desplazamientos laterales de las estructuras y sus potenciales demandas inelásticas. Es por esto que se han utilizado por muchos años en el diseño y construcción de edificios con diferentes características. Los muros de cortante suelen construirse en toda la altura del edificio, ya sea acoplados por vigas y/o losas, o como núcleos centrales con aberturas (puertas, elevadores, ventanas, corredores, etc.).

Existen diferentes métodos para estimar los desplazamientos en los muros “cerrados”, acoplados por vigas o losas, basados en diferentes teorías y con diferentes simplificaciones. Sin embargo, cuando se trata de muros con aberturas (ventanas, puertas, etc.), que son muy comunes, por ejemplo, en cubos de elevadores, aún no existen métodos exactos o confiables y que además sean simples para su aplicación en la práctica. Sin embargo, cabe señalar que no es tarea fácil proponer métodos simples que permitan estimar los desplazamientos, dada la cantidad de factores que intervienen en el comportamiento de muros con aberturas (dimensiones de muro, de aberturas, localización, etc.).

En este trabajo se comparan los métodos más comunes, con el método de los elementos finitos, aplicándolos a muros de diferentes niveles con diferentes tipos de aberturas y posiciones, como si éstos fueran dos muros acoplados, es decir, se revisa si tales métodos son aplicables o si se deben mejorar. Además, se considera la existencia del sistema de piso para estudiar que influencia tiene sobre las estimaciones.

## OBJETIVOS

---

### Objetivos generales

Evaluar el nivel de aproximación en el cálculo de los desplazamientos laterales en muros con aberturas obtenido con métodos simples cuando se comparan con el método de los elementos finitos.

### Objetivos específicos

Calcular los desplazamientos de los modelos elásticos con elementos finitos y evaluarlos con métodos simplificados.

Comparar el nivel de aproximación en el cálculo de los desplazamientos laterales y proponer mejoras, en su caso, que mantengan la simpleza de los métodos aproximados.

Establecer recomendaciones, observaciones y mejoras (en su caso) sobre los métodos simples evaluados.

## CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

### 1.1. Métodos analíticos propuestos para determinar desplazamientos laterales de muros con aberturas en el intervalo de comportamiento elástico

Existen diferentes trabajos analíticos y experimentales que tratan de estimar los desplazamientos laterales a partir del comportamiento como muro en voladizo, como se discute con detalle en Tena *et al.* (2011), y se resume a continuación.

#### 1.1.1. Método de Coull y Choudhury

Coull y Choudhury (1967) presentaron un método para determinar el desplazamiento lateral de edificios construidos por muros y losas. El método consiste en reemplazar las vigas de acoplamiento por un medio continuo de cortante puro (figura 1.1).

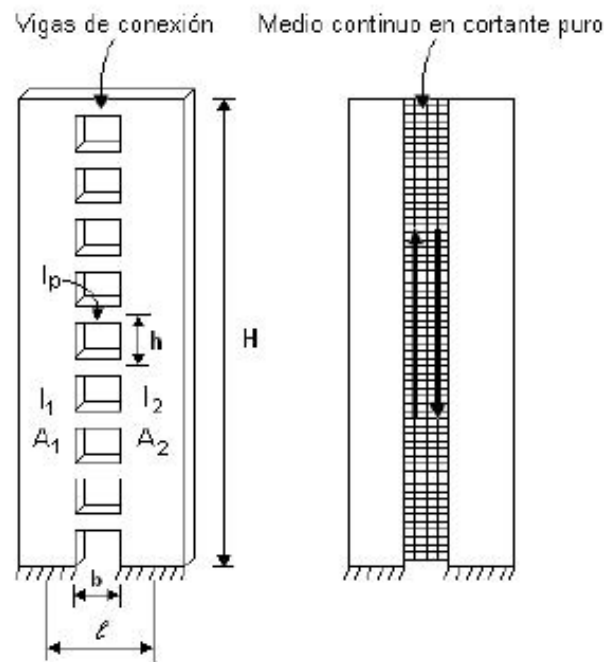


Figura 1.1. Modelo de Coull y Choudhury. Tomado de Tena *et al.* (2011)

Las aberturas regularmente están situadas en franjas verticales y, en el caso de una sola franja de aberturas, un parámetro para evaluar el efecto de las aberturas es  $\alpha H$ , donde:

$$\alpha = \sqrt{\beta \mu l}, \quad \beta = \frac{12 I_p l}{h b^3 (I_1 + I_2)}, \quad \mu = 1 + \frac{(A_1 + A_2)(I_1 + I_2)}{A_1 A_2 l^2} \quad (1.1)$$

Si  $\alpha H > 8$ , los muros tienden a comportarse como un muro en voladizo; pero si  $\alpha H < 4$ , el comportamiento tiende a parecerse al de dos muros acoplados por una viga, que se puede representar como un marco con columnas anchas. Cuando existe una sola hilera de aberturas,

el impacto de éstas en la rigidez lateral del muro se evalúa comparando los siguientes parámetros de rigidez:

$$K_w = \frac{3EI_w}{H^3}, \quad K_{wo} = \frac{3E(I_1+I_2)}{H^3 K_4} \quad (1.2)$$

donde  $K_w$  y  $K_{wo}$  son las rigideces laterales del muro con o sin aberturas, respectivamente,  $E$  es el módulo de elasticidad del muro,  $I_w$  es el momento de inercia del muro considerando que no tiene aberturas y:

$$K_4 = 1 - \frac{3}{\mu} \left[ \frac{1}{3} + \frac{\sinh(\alpha H)}{(\alpha H)^3 \cosh(\alpha H)} - \frac{1}{(\alpha H)^2} \right] \quad (1.3)$$

El desplazamiento lateral máximo  $\Delta$  en la parte superior del muro ante una carga lateral dada  $P$  se calcula con la ecuación:

$$\Delta = \frac{PH^3 K_4}{3E(I_1+I_2)} \quad (1.4)$$

#### 1.1.2. Método del marco equivalente

Schwaighofer y Microys (1969) propusieron el método del marco equivalente (*figura 1.2*), conocido también como método de la columna ancha equivalente; que fue propuesto para muros con aberturas conectados por vigas y tiene las siguientes hipótesis:

- Los ejes centroidales de las secciones transversales de los muros y de las vigas de conexión forman un marco.
- La sección transversal de las columnas del marco equivalente son las secciones transversales de los muros.
- Las partes centrales de las vigas tienen las mismas propiedades de las vigas de conexión de la estructura del muro de cortante.
- Las secciones extremas de las vigas tienen rigidez infinita a flexión.

Si no se consideran zonas infinitamente rígidas a flexión, proponen considerar áreas y momentos de inercia equivalentes para las secciones extremas de las vigas, donde se conectan con los muros en función de los parámetros  $e$  y  $f$ , donde  $e$  es la distancia entre el eje centroidal del muro y la abertura, y  $f$  es la distancia del centro de la abertura al muro que le corresponde a la columna.

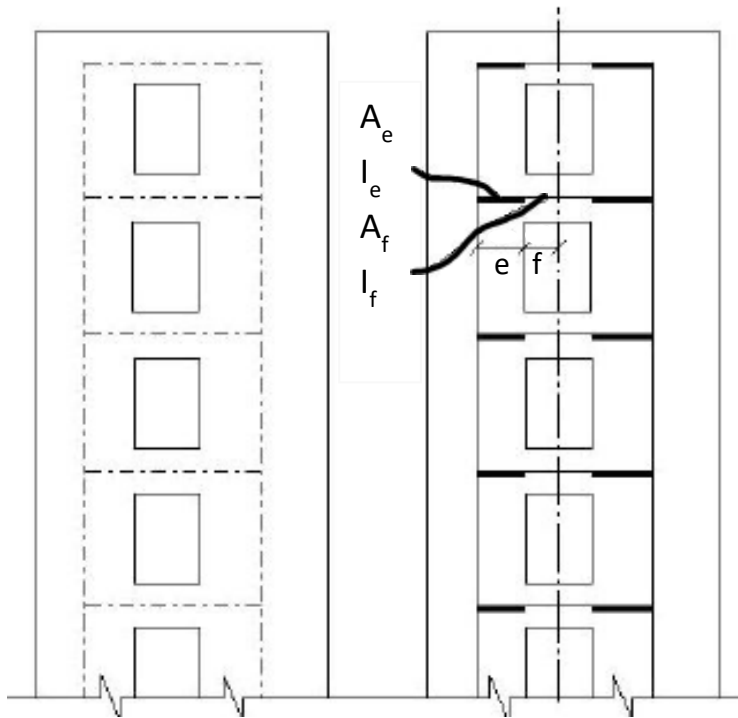


Figura 1.2. Marco equivalente propuesto por Schwaihofer y Microys. Adaptado de Tena et al. (2011)

Posteriormente, Harrison *et al.* (1975) explicaron que un análisis aceptable para muros acoplados requiere de un método que permita el alargamiento o acortamiento axial de los muros, y utilice un modelo teórico realista para las vigas de conexión que considere el ancho del muro, las deformaciones localizadas en la unión viga-columna y las deformaciones asociadas al cortante en la viga.

Cuando se analizan muros de cortante acoplados usando el método de las rigideces, primero se debe definir la posición de los nodos, que es donde se encuentran los grados de libertad y se desconocen los desplazamientos. Usualmente los nodos se asignan en las intersecciones de entrepisos y al centroide del elemento. La idea es considerar una viga con brazos rígidos en la zona donde hace contacto con el muro; además, se coloca un resorte rotacional y unos resortes verticales que simulan la traslación y rotación de dichos puntos.

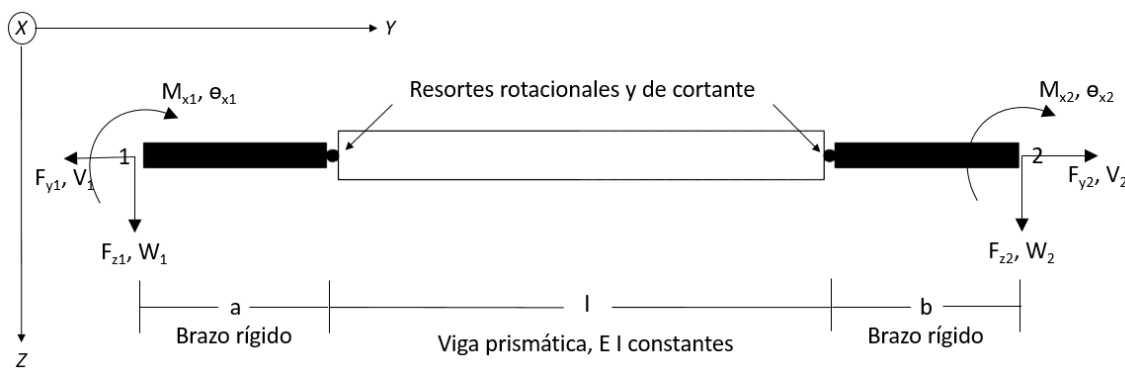


Figura 1.3. Vigas de conexión de muros de cortante con brazos rígidos y resortes



Con su modelo observaron que el comportamiento lateral de los muros depende también de la rigidez de la viga que los une, de manera que, mientras más peraltada sea ésta, mayor influencia tendrán dichas modificaciones en la rigidez de la unión viga-muro. Además, analizaron diferentes alturas, resultando que mientras más niveles tenga la estructura, los muros trabajan más y el efecto de las reducciones de la rigidez del nodo se vuelve menos significativo, y a partir de 17 niveles se vuelve insignificante. Las reducciones de la rigidez del nodo tienen un efecto menor al 10% en la rigidez del sistema, y no se tienen parámetros confiables de la geometría, por lo que se sugiere incluirlos en el modelo.

Por otra parte, en varios estudios se han propuesto recomendaciones para el diseño y detalle de muros de cortante acoplados (CSW, por sus siglas en inglés “Coupling Shear Walls”), por ejemplo Paulay en 1971, Schnobrich en 1977 o Wight en 1988 y, además, se ha demostrado que la geometría y la resistencia del sistema de acoplamiento tienen mucha influencia en el comportamiento de estos elementos (Chaallal *et al.* 1996). Los CSWs reaccionan en función del grado de acoplamiento (DC, también por sus siglas en inglés “Degree of Coupling”), que es la relación de la rigidez de la viga de acoplamiento relativa a los muros.

El nivel de acoplamiento se puede clasificar en:

1. Bajo, muros aislados ligados
2. Intermedio, acoplamiento efectivo
3. Alto, muros con aberturas

Los objetivos del estudio de Chaallal *et al.* (1996) fueron:

- a) Desarrollar un método para evaluar el grado de acoplamiento fácilmente a partir de la geometría de los CSWs
- b) Desarrollar un método racional para la clasificación de los CSWs

En el método empleado por Chaallal *et al.* (1996), el grado de acoplamiento  $DC$  y el momento de volteo  $M_0$  se calculan con base en las ecuaciones 1.5:

$$DC = \frac{Pl}{M_0} \quad y \quad M_0 = M_1 + M_2 + Pl \quad (1.5)$$

donde  $P$  es la carga vertical en los muros debida al cortante que producen las cargas axiales actuantes en la viga bajo acciones laterales,  $l$  es la distancia entre los centroides de los muros,  $M_1$  y  $M_2$  son los momentos generados en los muros por las cargas laterales.

Para obtener las fuerzas axiales  $P$  se requiere del análisis estructural, por lo que es importante contar con un método sencillo y eficiente para dar un valor aproximado del grado de acoplamiento. Por lo tanto, en el método propuesto por Chaallal *et al.* (1996) se estima el parámetro  $DC$  con base en regresiones estadísticas como:

$$DC = k \frac{H_b^a}{D_w^b L_b^c} \quad (1.6)$$

donde  $H_b$  y  $L_b$  son la altura y longitud de las vigas de acoplamiento,  $D_w$  es la longitud del muro y los valores de  $k$ ,  $a$ ,  $b$  y  $c$  se obtienen de la *tabla 1-1*, con base en el número de pisos  $n$ .

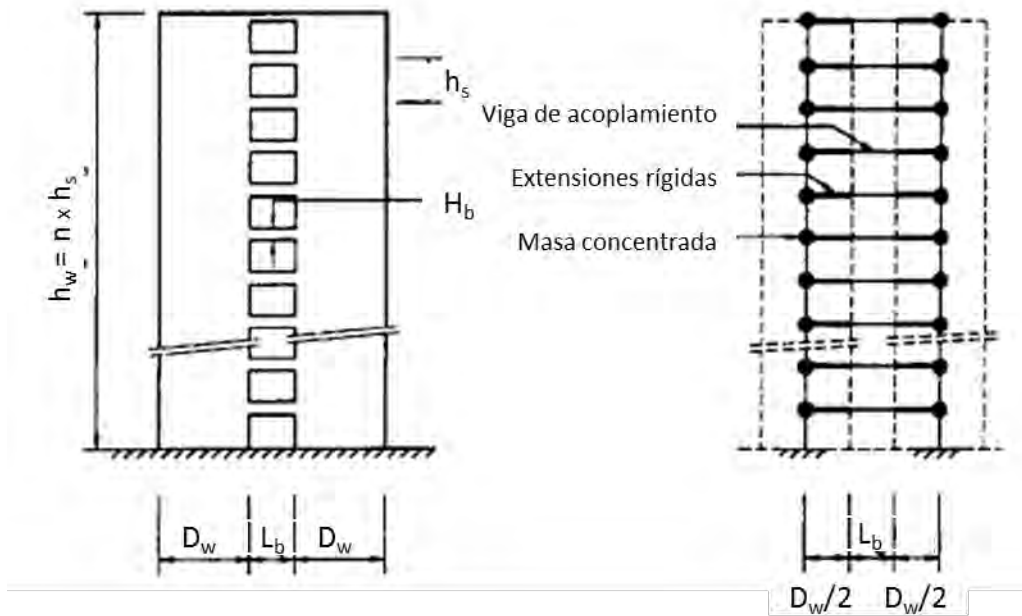


Figura 1.4. Configuración y modelado de muros de cortante acoplados. Traducida de Chaallal et al. (1996)

Número de pisos $n$	$k$	$a$	$b$	$c$
6	2.976	0.706	0.615	0.698
10	2.342	0.512	0.462	0.509
15	1.697	0.352	0.345	0.279
20	1.463	0.265	0.281	0.190
30	1.295	0.193	0.223	0.106
40	1.190	0.145	0.188	0.059

Tabla 1-1. Valores de la constante  $k$  y los exponentes  $a$ ,  $b$  y  $c$  de la ecuación 1.6. Traducida de Chaallal et al. (1996)

Los muros se idealizan como columnas anchas conectadas con vigas con extensiones infinitamente rígidas, y las matrices de rigidez de las vigas se transforman a los ejes de los muros para fines de cálculo. Nótese que no se está considerando la rigidez de la losa, pues se considera un análisis en dos dimensiones y, por lo tanto, no se están considerando los efectos de torsión.

Además, Chaallal *et al.* (1996) propusieron otra aproximación considerando los momentos de inercia efectivos de las vigas y los muros, conforme a la ecuación 1.7, donde  $\gamma_b$  y  $\gamma_w$  son respectivamente los coeficientes que definen el momento de inercia efectivo ( $I_e$ ) de vigas y muros con respecto al momento de inercia de su sección gruesa ( $I_g$ ), es decir, ( $I_e = \gamma I_g$ ):

$$DC = \frac{(\gamma_b/0.6)^{a/3}}{(\gamma_w/0.6)^{b/3}} k \frac{H_b^a}{D_w^b L_b^c} \quad (1.7)$$

Varios autores han propuesto valores para  $\gamma_b$  y  $\gamma_w$ . Por ejemplo, Park y Paulay propusieron 0.6 para muros, Paulay y Priestley propusieron 0.2 para vigas con refuerzo convencional o 0.4 si tuvieran refuerzo diagonal, pero pueden utilizarse otros valores (Chaallal *et al.* 1996).

Chaallal *et al.* (1996) observaron que mientras más niveles tengan la estructura, menor es la influencia de la relación  $H_b/L_b$  en el grado de acoplamiento (DC < 0.33 significa acoplamiento ineficiente según la Canadian Standards Association, CSA). Por lo tanto, muchos CSWs con grado de acoplamiento mayor a 0.33, incluidos algunos acoplados únicamente por losas, o algunos con más de 30 niveles, tienen DC mayor a 0.66 a pesar de tener relaciones  $H_b/L_b$  muy pequeñas. Finalmente, la CSA recomienda evaluar el grado de acoplamiento entre los muros y las vigas calculando la porción del momento de volteo en la base transportado por las fuerzas axiales resultantes del cortante en las vigas, pero se requiere realizar análisis estructural y es un procedimiento largo.

Las preguntas son ¿cómo calcular el grado de acoplamiento? Y, ¿cómo clasificar los CSWs? La CSA permite dos tipos de acoplamiento:

- Parcial, cuando  $DC < 0.66$
- Total, cuando  $DC \geq 0.66$

No se dan límites para cuando el acoplamiento es ineficiente o cuando se comporta como muro con aberturas (Challaal *et al.* 1996).

### 1.1.3. Método del elemento finito

Chan y Cheung (1979) reportaron que los muros en voladizo pueden ser analizados mediante métodos de elementos finitos, que dependiendo del tipo y cantidad de elementos se vuelve más complicado el cálculo. Ellos aplicaron el método con una tira de elementos y obtuvieron una buena aproximación, que mejora a medida que se incrementa el número de elementos.

Kim y Lee (2003) realizaron análisis comparativos utilizando elementos finitos de ocho y doce grados de libertad (GDL), *Figura 1.5*. Al utilizar elementos de ocho GDL, no se obtuvieron resultados tan aproximados y no son del todo compatibles con los elementos

correspondientes a las vigas, a diferencia de cuando se utilizan elementos de 12 GDL, que son compatibles con los elementos de las vigas, incluso si se toma un solo elemento por entrepiso.

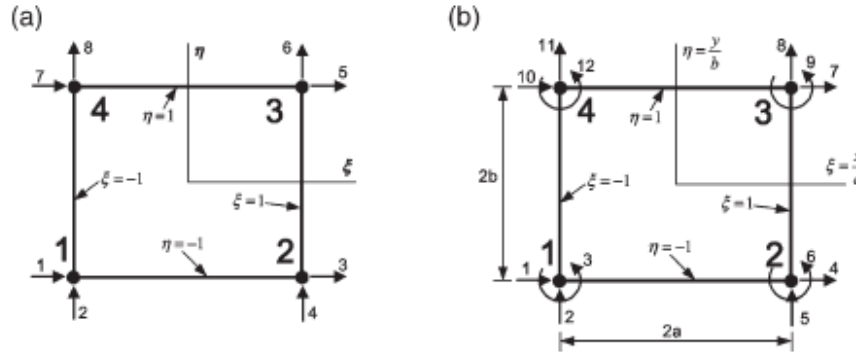


Figura 1.5. Elemento de esfuerzo plano para muros de cortante. Kim y Lee (2003)

Kim y Lee (2003) compararon cuatro mallados diferentes para el muro de un entrepiso de un edificio utilizando elementos de 8 GDL con un solo elemento por entrepiso de 12 GDL y con la solución exacta de la teoría elástica. Ellos observaron que a medida que se refina la malla, se aproximan poco a poco los esfuerzos con los elementos de 8 GDL, mientras que, con elementos de orden superior (12 GDL), con un solo elemento basta para obtener la solución exacta.

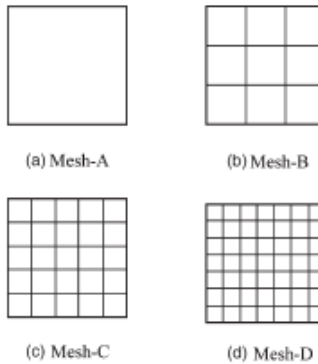


Figura 1.6. Tipos de mallas para elementos Q4. Kim y Lee (2003)

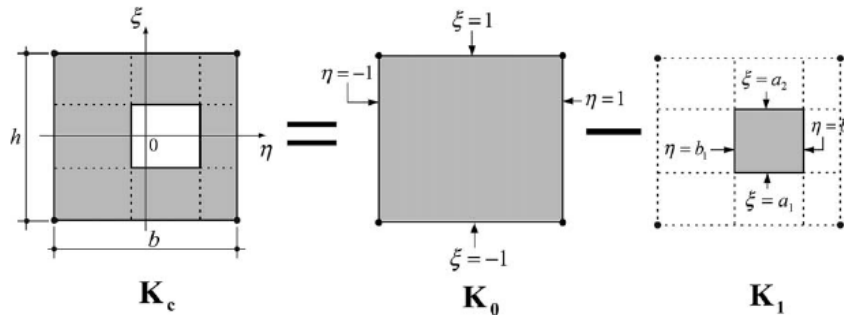
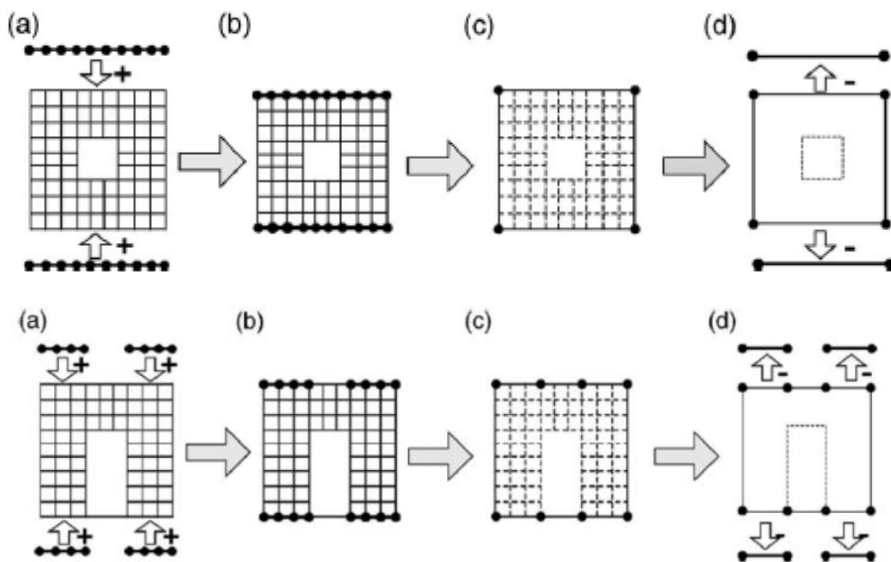


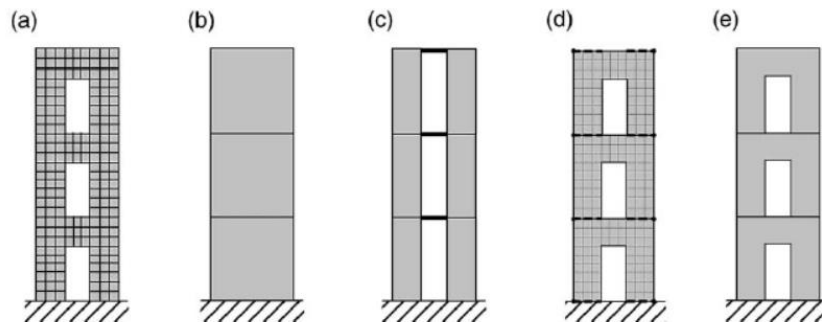
Figura 1.7. Procedimiento para la obtención de la matriz de rigidez del elemento plano con aberturas propuesto por Choi y Bang en 1987. Tomado de Kim y Lee (2003)

De acuerdo con Kim y Lee (2003), en 1987 Choi y Bang propusieron un método eficiente para calcular la rigidez de muros con aberturas, que consistía en restar la rigidez de un elemento del tamaño de la abertura a la del muro sin abertura (*Figura 1.7*). Para la obtención de los super elementos en los muros con aberturas, se parte del mallado del muro y se condensa la matriz, para obtener un elemento por entrepiso, pero no existe compatibilidad en la unión entre ellos. Debido a esto, se puede subestimar la rigidez lateral de toda la estructura en comparación con la malla, por lo que ellos proponen el uso de vigas rígidas ficticias que unan a los super elementos, que vuelven compatibles las deformaciones entre ellos, pero la rigidez de ésta se debe restar al super elemento. Observaron que a medida que la viga se vuelve más rígida, los desplazamientos tienden a parecerse a los del modelo con un mallado fino. Kim y Lee (2003) mencionan como regla de oro el utilizar una viga con el espesor de los muros y altura igual a la del entrepiso. Ellos también aplicaron el método a muros con aberturas de puertas (*Figura 1.8*).



*Figura 1.8. Uso de vigas ficticias para muros de cortante con ventana y puerta. Kim y Lee (2003)*

Para verificar el funcionamiento del método, Kim y Lee (2003) lo aplicaron a muros con diferentes tipos de aberturas y configuraciones, cambiando el tamaño de las aberturas, utilizando cinco modelos: un modelo refinado, un modelo sin considerar la abertura, otro como columna ancha con viga equivalente, el propuesto y elemento propuesto por Choi y Bang (*Figura 1.9*).



*Figura 1.9. Ejemplos de los tipos de modelos analizados. Kim y Lee (2003)*

Para todos los casos, el modelo propuesto dio resultados muy similares a los del modelo más refinado. También se analizaron muros conectados a marcos, simulando que el muro fuera el núcleo con una y con dos aberturas, donde se observó que el modelo también funciona muy bien. Posteriormente, hicieron análisis dinámicos en dos dimensiones obteniendo el mismo resultado.

Kim y Lee (2003) concluyen que respecto al modelo con mallado fino:

- El elemento de Choi y Bang tiene resultados similares cuando las aberturas son pequeñas
- Los modelos con viga equivalente tienen resultados parecidos cuando el peralte de la viga es pequeño, y a medida que se aumente el peralte se subestima la rigidez de la estructura e incrementan los desplazamientos
- El modelo propuesto tiene resultados muy parecidos sin importar el número, tamaño y localización de aberturas, además de que el tiempo de análisis es considerablemente menor

#### 1.1.4. Comparación de algunos métodos simplificados con elementos finitos

Tena et al. (2011) realizaron una serie de estudios con modelos elásticos de muros de un nivel y de diferentes niveles, variando el tipo y cantidad de aberturas (*figuras 1.10 y 1.11*), y evaluaron las aproximaciones obtenidas con distintos métodos simplificados al compararlas con el método de los elementos finitos.

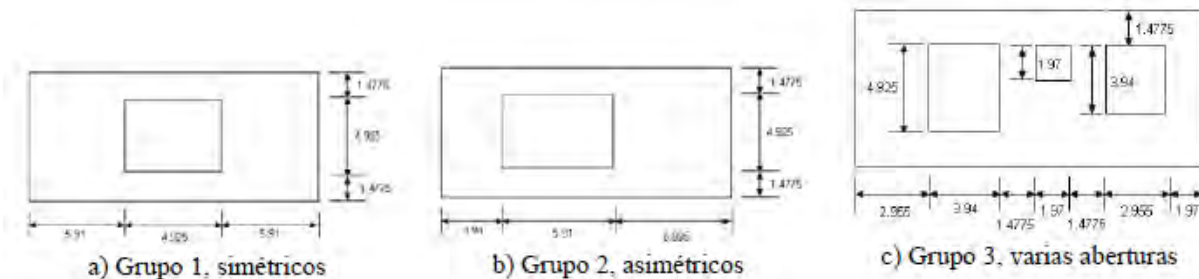


Figura 1.10. Grupos de muros de varios niveles en estudio (dimensiones en pies). Tena et al. (2011)

De los resultados obtenidos en el estudio y en comparación al método de elementos finitos (*figura 1.12*), Tena et al. (2011) concluyen:

- Con respecto al método de Coull y Choudhury, se apreció que cuando se cuenta con una sola franja de aberturas, la precisión del método depende de la altura o relación de esbeltez, por lo que las estimaciones para los modelos que tienden a ser robustos ( $H/L < 2$ ) son malas aún para sistemas simétricos. Sin embargo, la precisión aumenta a medida que se aumenta la esbeltez. No se aprecia una disminución significativa en la aproximación a medida que aumenta la excentricidad. La aproximación es menor para muros de varios niveles con varias aberturas por nivel, en parte por las hipótesis en el cálculo de la apertura equivalente. Observaron que la hipótesis de variación del método de Coull y Choudhury para estimar los desplazamientos a cualquier altura ( $x$ ) propuesta por Rivera en 2006 es muy razonable, el cual está dada por la *ecuación 1.8*,

que es una versión mejorada de la ecuación 1.4, donde  $P$  es la carga lateral,  $x$  es la altura de interés,  $K_4$  se calcula conforme a la ecuación 1.3 y el resto de los términos se definieron anteriormente (Figura 1.1 y ecuación 1.4). Por lo tanto, proponen emplear la variante del método para relaciones de esbeltez  $H/L < 4$  y cualquier excentricidad para muros con una sola franja de aberturas para obtener estimaciones cercanas o mayores al 80% del desplazamiento lateral.

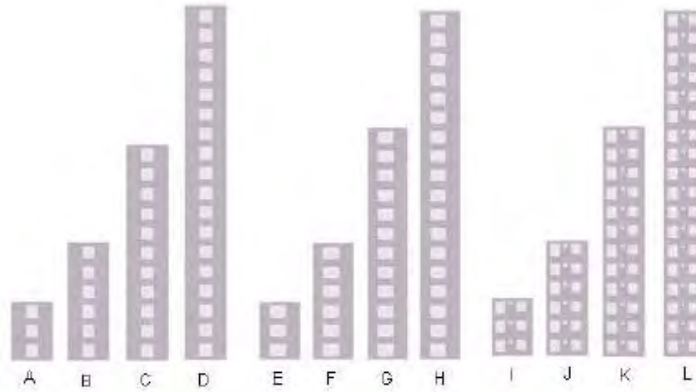


Figura 1.11. Elevaciones características de los tres grupos de muros. Tena et al. (2011)

$$\Delta(x) = \frac{PH^{5/4}x^{7/4}K_4}{3E(I_1+I_2)}; \quad 0 \leq x \leq H \quad (1.8)$$

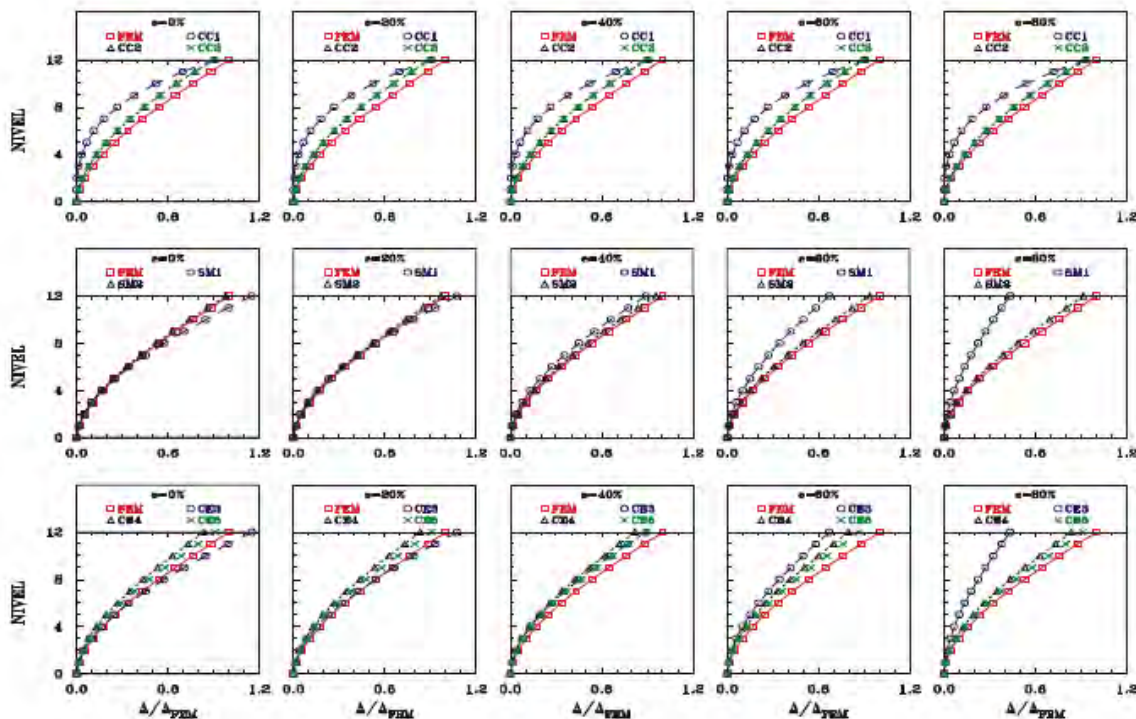


Figura 1.12. Curvas de comparación de los perfiles de desplazamientos laterales promedio respecto a FEM de 12 niveles (Tena et al. 2011)

- Con respecto al método del marco equivalente como lo propusieron originalmente Schwaighofer y Microys, para modelos de tres o más niveles, observaron que la aproximación aumenta conforme aumenta la esbeltez y es exacta cuando se cuenta con una sola franja de aberturas y no existe excentricidad o es menor al 20%, si se emplea la propuesta original de Schwaighofer y Microys. Sin embargo, si la excentricidad es mayor al 40% o si se dispone de un patrón complicado con varias aberturas, el modelo pierde aproximación.
- Si se emplea el método del marco equivalente tal cual se entiende en México, como columna ancha, las aproximaciones son buenas y mejoran a medida que aumenta la relación de esbeltez del muro, pero cuando se tienen varias aberturas y se obtiene una equivalente, se observa lo contrario. Destacan que, para muros con una sola franja de aberturas, la precisión del modelo no se reduce a medida que se aumenta la excentricidad, ya que ésta es la hipótesis central en que se fundamenta el método, el cual no puede lograr aproximaciones similares para patrones de aberturas más complejos, aun estimando una abertura equivalente.
- Con base en sus resultados, concluyen que la versión del marco equivalente más utilizada en México es más confiable que el método originalmente propuesto por Schwaighofer y Microys para muros que contienen una sola franja de aberturas, sobre todo si la excentricidad es mayor al 40%. Para excentricidades menores al 20%, ambos métodos tienen buenas aproximaciones.
- Con respecto al método de la columna ancha equivalente de sección variable que propusieron y sus variantes (Tena *et al.* 2011), tiene la ventaja de poder intentar tomar en cuenta los abruptos cambios de rigidez en elevación, pero obviamente no puede cuantificar con exactitud la flexibilidad del muro en las zonas aledañas a las aberturas, ni cómo afectan las asimetrías de las aberturas en longitud. A pesar de estas limitaciones, las aproximaciones son razonables y consistentes. Las mejores aproximaciones se obtienen con el modelo donde se consideran las inercias individuales de los segmentos de muretes en la zona de la abertura, sobre todo para muros de un solo nivel. La imprecisión crece a medida que las aberturas son más grandes en muros simétricos; sin embargo, la precisión mejora a medida que el muro es más esbelto. En general, éste modelo es el de mejor aproximación para muros simétricos o con asimetrías menores al 20% y cuando se tiene una sola franja de aberturas. Sin embargo, se subestiman los desplazamientos laterales a medida que aumenta la excentricidad.
- Cuando se emplea el método de la columna ancha equivalente de sección variable considerando la inercia completa, es recomendable corregir las estimaciones tomando en cuenta que el método sobrestima la rigidez a flexión y a cortante de los muros, sobre todo cuando la relación de esbeltez es baja, por lo que es razonable amplificar los desplazamientos obtenidos, en función tanto de la relación de esbeltez como de la excentricidad relativa, empleando los factores propuestos por los autores.



- Finalmente, Tena *et al.* (2011) concluyen que los métodos de Coull y Choudhury, del marco equivalente y de la columna ancha equivalente de sección variable son confiables cuando se dispone de una sola franja de aberturas y los muros son: esbeltos, simétricos o de excentricidad menor a 20% y la abertura es razonablemente grande. Con excepción del método del marco equivalente más utilizado en México, la precisión de estos métodos se reduce a medida que se aumenta la excentricidad, sobre todo cuando es mayor a 40%, y cuando los muros tienden a ser robustos.
- Todos los métodos pierden precisión cuando existen múltiples aberturas, sobre todo si su patrón es complejo a lo largo y a lo ancho del muro, aún con la definición de una abertura equivalente. Por ello, ellos mencionan que es importante continuar estudiando expresiones simples para tomar en cuenta: a) el impacto de la excentricidad de la abertura en la amplificación del desplazamiento lateral promedio de los muros cuando se emplean métodos simplificados y, b) en el caso de muros con varias aberturas, definir una abertura equivalente que permita mejorar las aproximaciones obtenidas con la propuesta valorada en su trabajo. También mencionan que sería relevante estudiar el impacto de modelar la rigidez adicional que aportan las conexiones con distintos sistemas de piso (losas de concreto perimetrales, losa-acero, prefabricados, sistemas de piso de madera, etc.).

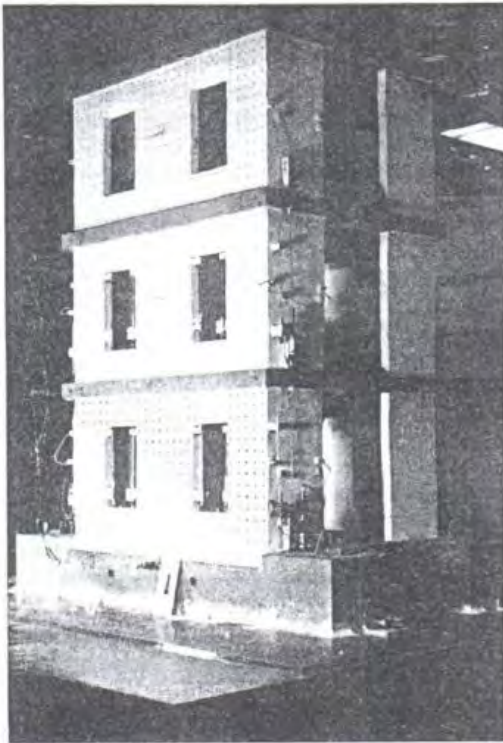
## 1.2. Investigaciones experimentales de muros con aberturas ante cargas laterales

Abrams *et al.* (1990) realizaron pruebas con modelos a escala (*Figura 1.13*) en una mesa vibradora para entender el comportamiento de la mampostería reforzada en el intervalo no lineal (*Figura 1.14*), aplicando excitaciones que fueron incrementando y sus objetivos de estudio fueron:

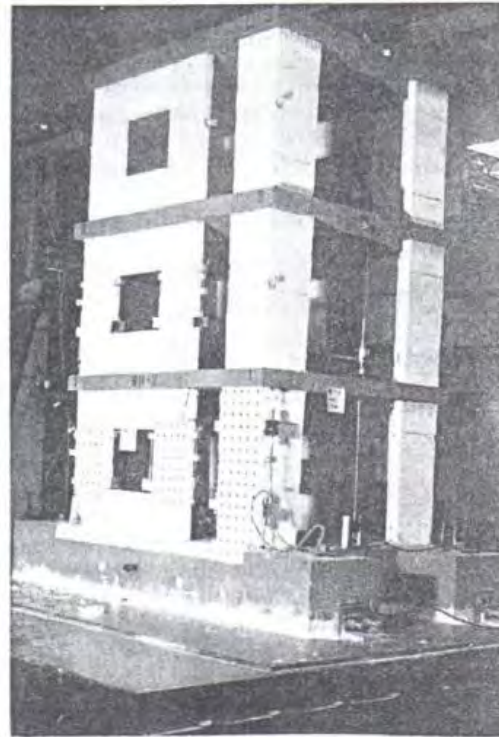
1. Generar información experimental que confirmara los modelos numéricos.
2. Validar prácticas comunes en el diseño sísmico y en el análisis de la respuesta sísmica.
3. Proponer simplificaciones en los métodos de diseño o análisis.
4. Reproducir razonablemente con modelos analíticos simples la respuesta dinámica no lineal de estructuras de mampostería.
5. Obtener información representativa que pueda extrapolarse para el comportamiento de estructuras de gran escala.

La información obtenida fue punto de referencia para verificar los métodos analíticos. Concluyen que su trabajo es relevante para ampliar el conocimiento de cómo es el comportamiento no lineal de la mampostería reforzada. Se obtuvieron buenas aproximaciones cuando se utilizan modelos a escala 1:4. Se pudo predecir el agrietamiento y la fluencia del refuerzo para excitaciones en la base. Aunque mencionan que los resultados presentados son válidos únicamente para las dos estructuras analizadas y con el sismo utilizado; sin embargo,

se pueden extrapolar a distintas configuraciones y sismos, usando modelos numéricos calibrados con la información de sus pruebas.

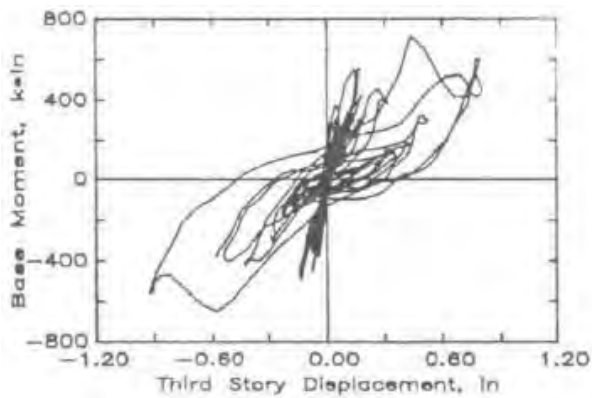


a) Estructura RM1

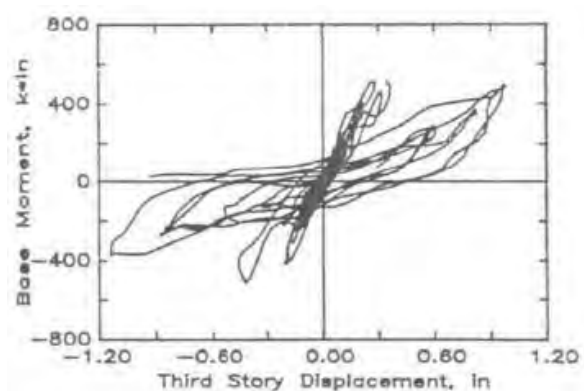


b) Estructura RM3

Figura 1.13. Especímenes en la mesa vibradora. Tomado de Abrams et al. (1990)



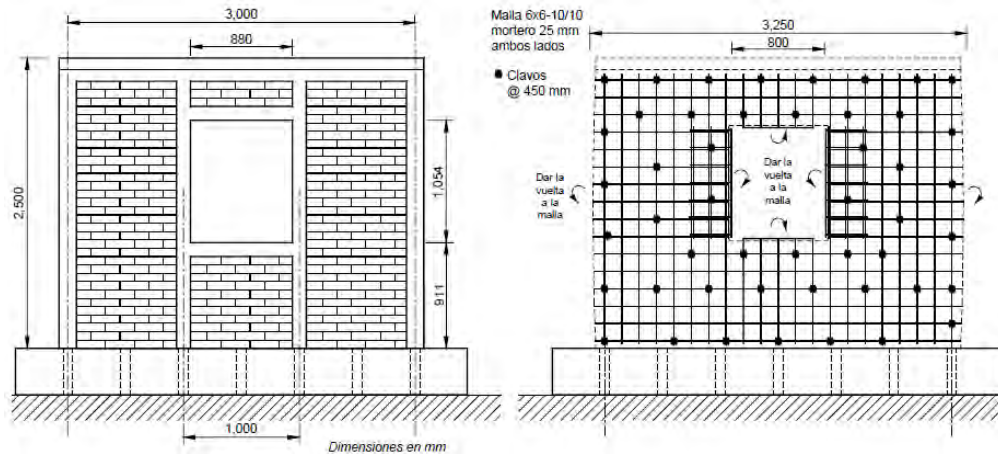
a) Estructura RM1



b) Estructura RM3

Figura 1.14. Momento en la base vs desplazamientos de azotea. Tomado de Abrams et al. (1990)

Flores *et al.* (2004) presentaron los resultados del ensaye de dos muros de mampostería con una abertura al centro, rehabilitados con malla de alambre soldado y recubrimiento de mortero. Tales ensayos fueron antes cargas cíclicas. El primer modelo no contaba con refuerzo alrededor de la abertura, a diferencia del segundo, que sí contaba con elementos de confinamiento y que es el que se muestra en la *Figura 1.15a*.



a) Modelo original con refuerzo en abertura

b) Malla y posición de los conectores

Figura 1.15. Dimensiones generales de los modelos. Tomado de Flores et al. (2004)

Ambos especímenes fueron previamente ensayados ante cargas laterales cíclicas y llevados a un nivel de daño severo. La rehabilitación incluyó la reparación de los castillos (demolición y colado de la zona dañada), reemplazo de piezas de mampostería y/o relleno de grietas con motero y la colocación de la malla (en ambos lados del muro), rodeando los bordes del muro en los extremos y en la abertura. Dicho proceso fue realizado soportando una carga vertical constante que simulaba las condiciones de un muro real.

Como resultado, los muros rehabilitados superaron ampliamente la respuesta de los especímenes originales, tanto en rigidez inicial, carga de agrietamiento, cortante máximo como en capacidad de deformación. La falla ocurrió al fracturarse los alambres de la malla. La resistencia de los modelos reparados fue de tres veces la de los especímenes originales.

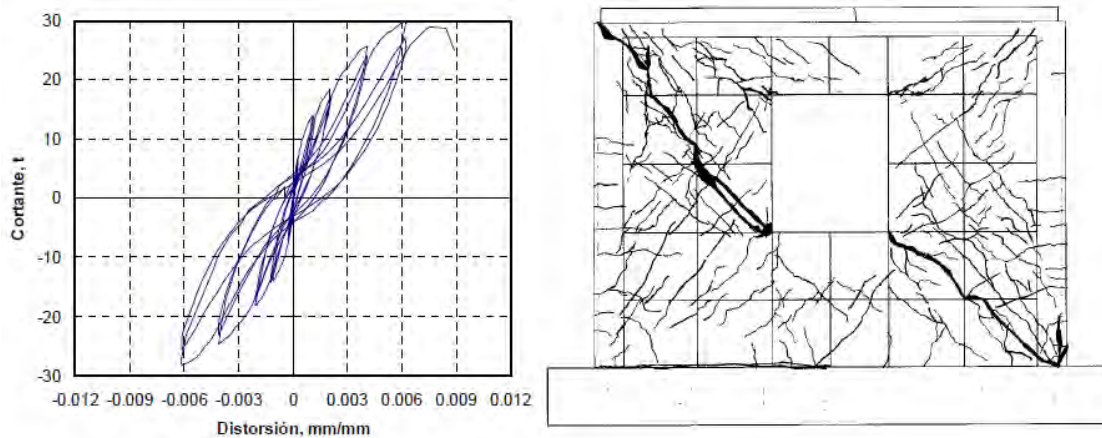


Figura 1.16. Curva de histéresis y patrón de agrietamiento final del modelo sin confinamiento alrededor abertura. Tomado de Flores et al. (2004)

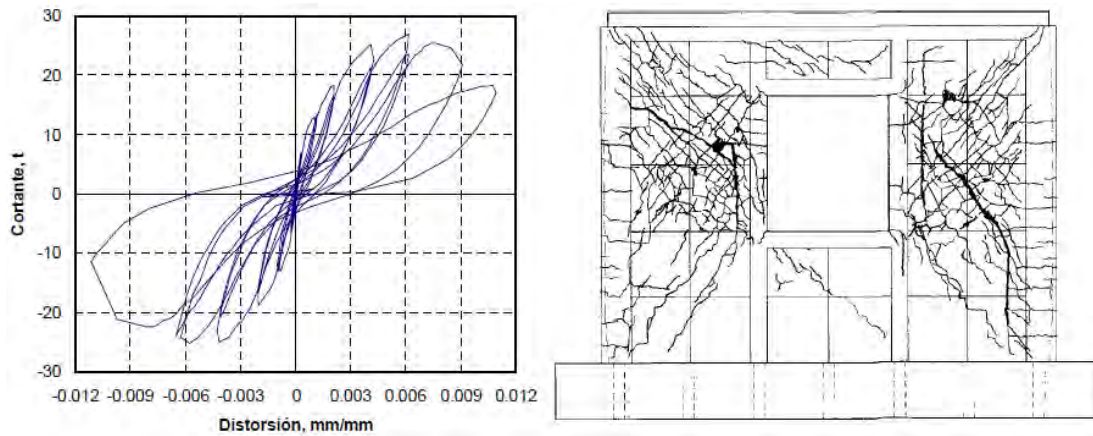


Figura 1.17. Curva de histéresis y patrón de agrietamiento final del modelo con elementos confinantes alrededor abertura. Tomado de Flores et al. (2004)

Para fines de rehabilitación recomiendan ampliamente el uso de esta técnica. Las ecuaciones de cálculo que se pueden tomar de las NTCM-04 son adecuadas para el diseño de esta rehabilitación. Concluyen, además, que esta técnica se puede aplicar a muros con aberturas que carecen de refuerzo (castillos y dalas). Sin embargo, fuera de las aberturas, siempre será necesario contar con la cantidad mínima de refuerzo vertical, sea como castillos o como refuerzo interior, a fin de evitar la falla de flexión o de deslizamiento en la base del muro.

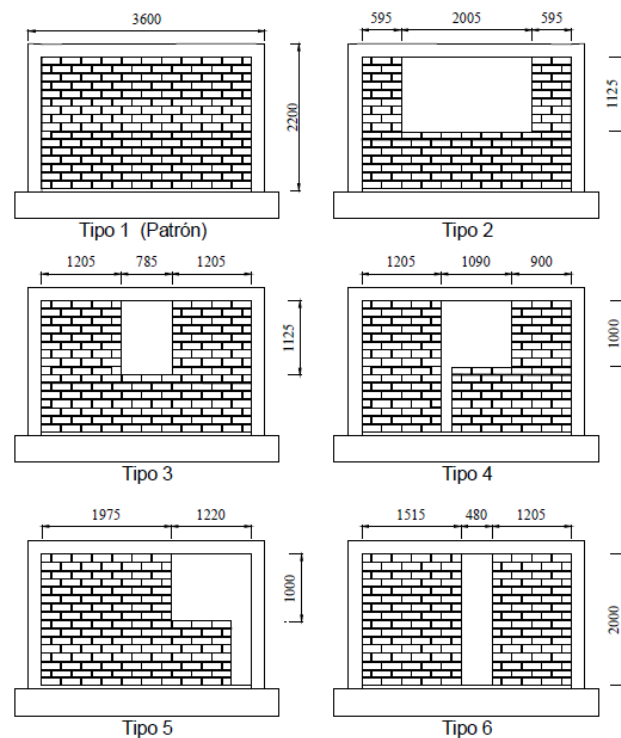


Figura 1.18. Geometría y dimensiones de los muros. Tomado de Astroza y Ogaz (2005)

Astroza y Ogaz (2005) presentaron los resultados de un estudio experimental de 12 muros de mampostería confinada a escala real sin y con distintos tipos de aberturas, contruidos con tabique cerámico con huecos (*Figura 1.18*). El refuerzo de la abertura consistió en una barra vertical de 10 mm de diámetro, ubicada en los huecos de las unidades vecinas a la abertura, y una escalerilla electrosoldada ubicada en la primera junta de mortero bajo la ventana. Los muros se ensayaron con una carga lateral cíclica, hasta alcanzar un desplazamiento de 4 cm.

Astroza y Ogaz concluyen, entre otras cosas, que la rigidez del sistema post-agrietamiento puede considerarse igual al 30% de la rigidez inicial, aunque los resultados presentaron dispersiones. La posición y el tamaño de las aberturas influyen en la respuesta de los muros, produciéndose en algunos casos una asimetría del comportamiento.



## CAPÍTULO 2. MUROS CON UNA SOLA ABERTURA

Por ser la configuración más comúnmente empleada en la práctica, así como reportada en la literatura técnica, en este trabajo se tomaron en cuenta muros con una sola fila de aberturas. Se consideraron modelos con tres configuraciones diferentes en función de la excentricidad (posición) de la abertura y un parámetro (o porcentaje) de abertura de aproximadamente 18% (figura 2.1):

- Simétricos: Abertura al centro.
- Asimétricos: Abertura con excentricidad del 40%.
- Abertura con excentricidad del 82%.

El cálculo de la excentricidad se explica líneas más adelante. Para todos los casos, se consideraron muros de 3, 6, 9, 12, 15 y 18 niveles, con tres tipos diferentes de piezas de mampostería de concreto y, además, la ausencia y presencia del sistema de piso, considerando seis tipos de piso, resultando así un total de 378 modelos (Apéndice A). Sin embargo, cabe señalar que como los análisis fueron de tipo elástico, los resultados son representativos para muros sólidos hechos de otros materiales (concreto reforzado, madera, láminas de acero, etc), pero que tengan propiedades de rigidez elástica ( $EI$  y  $GA_c$ ) equivalentes.

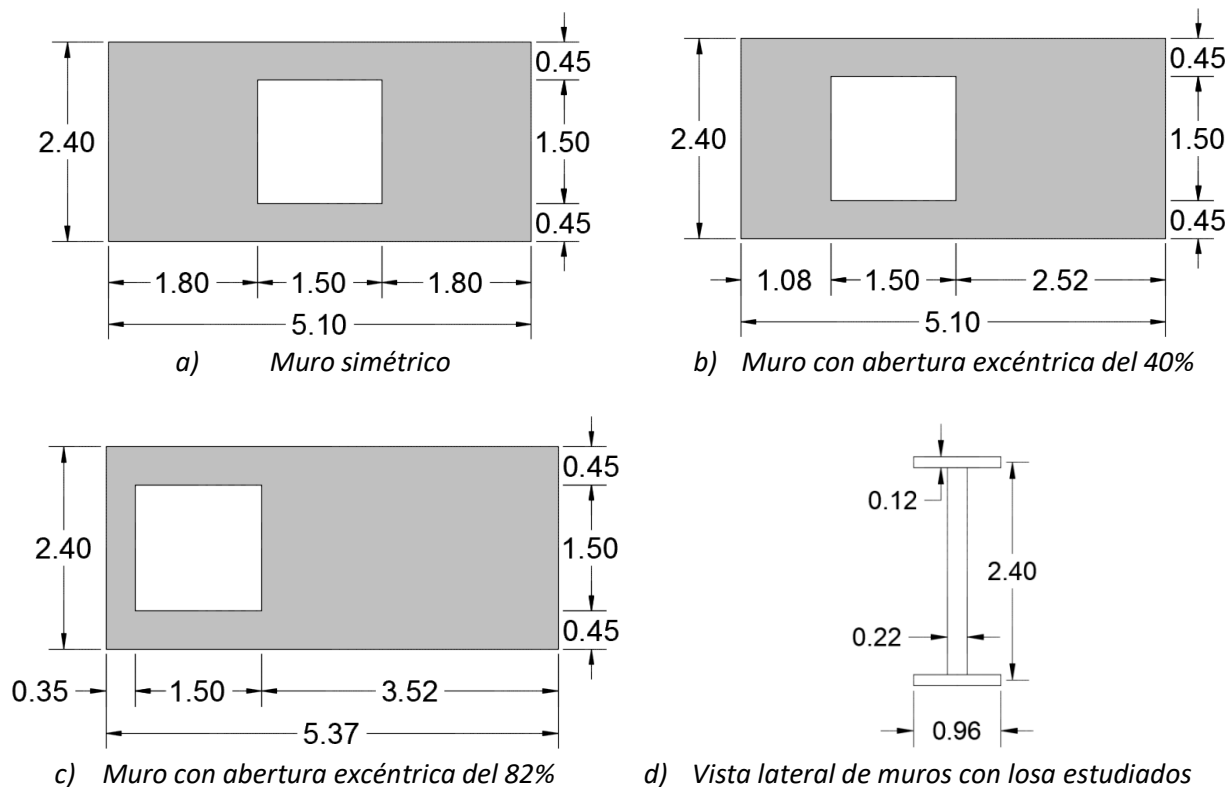


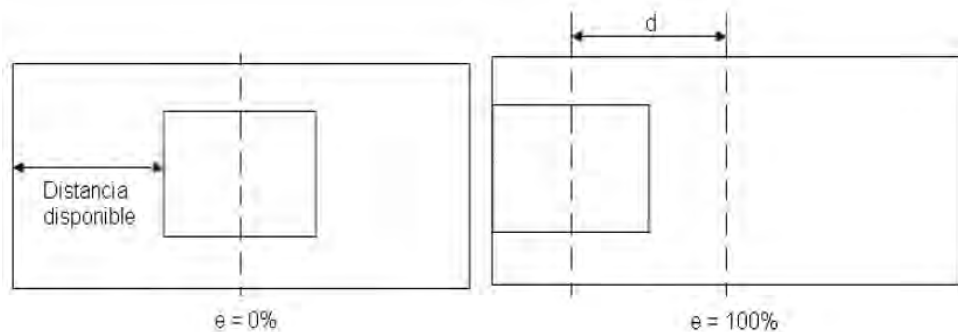
Figura 2.1. Dimensiones (en metros) de los muros de una sola fila de aberturas estudiados

Las dimensiones del muro coinciden con las empleadas previamente por Rivera (2006) y Tena *et al.* (2011), en dónde se utilizó un muro que tenía 5.10 m de ancho por 2.40 m de alto (*figura 1.10a*), y un espesor de 22 cm. En el caso de la losa, se consideró un espesor de 12 cm y un ancho a cada lado de cuatro veces el espesor de la losa ( $4t$ ) como se indica en las Normas Técnicas Complementarias de Estructuras de Mampostería (NTCM-04 2004) del Reglamento para las Construcciones del Distrito Federal Vigente. El patín equivalente de  $8t$  se ubicó en los centros de ejes en los tres métodos estudiados (*figura 2.1d*).

La fuerza lateral aplicada fue de 158.76 ton (350 kips), en el nivel de azotea para todos los modelos en todos los métodos.

La excentricidad se mide como la distancia entre los centroides de la abertura y del área gruesa del muro, y se calcula según la *ecuación 2.1* a partir de las definiciones de la *figura 2.2*.

$$e = 100 \left( \frac{2d}{L-l_0} \right) \quad (2.1)$$



*Figura 2.2. Definición de la excentricidad de muros con aberturas (Tena et al. 2011)*

En el caso de los muros con mayor excentricidad, se pretendía que ésta fuera del 80%, pero por algunos errores en la definición de la malla utilizada para elaborar los modelos de elementos finitos, el ancho del muro resultó más grande. Éstas mismas dimensiones se tomaron para los métodos simplificados, por lo que la comparación sigue siendo equivalente.

La consideración de cada tipo de mampostería de piezas de concreto y sistema de piso (losa de concreto maciza), se introdujo mediante la rigidez de los materiales que conformaron dichos elementos, es decir, se fue variando el módulo elástico de los materiales tanto del muro como de las losas. A excepción del primer valor, que fue con el que se calibraron los análisis, se utilizaron números “cerrados” para los valores propuestos para los módulos de elasticidad ( $E$ ) de las losas y de las piezas de concreto. De esta manera, se calcularon conforme a la propuesta de las NTCM-04 los valores aproximados de la resistencia a la compresión de la mampostería ( $f_m^*$ ) para las piezas de concreto, y para las losas conforme a las ecuaciones propuestas en las NTCC-04 (2004) para el módulo de elasticidad del concreto en función de la resistencia índice a la compresión  $f_c'$ . Los valores empleados en el estudio se reportan en las *tablas 2-1. y 2-2.*

<b>Propiedades de muros</b>		
	<b>E</b> <b>(ton/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>f<sup>*</sup><sub>m</sub></b> <b>(kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>A</b>	84	400
<b>B</b>	36	150
<b>C</b>	12	60

Tabla 2-1. Propiedades de muros utilizadas en los análisis

<b>Propiedades Losas</b>		
	<b>E</b> <b>(ton/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>f<sub>c</sub></b> <b>(kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>I</b>	Sin losa	
<b>II</b>	84	110
<b>III</b>	100	156
<b>IV</b>	150	186
<b>V</b>	200	204
<b>VI</b>	250	319
<b>VII</b>	300	459

Tabla 2-2. Propiedades de losas utilizadas en los análisis

## 2.1. Estimaciones con elementos finitos

Todos los modelos con elementos finitos empleados en este trabajo fueron elaborados en el programa SAP2000 (CSI-2005 2005). Para verificar que los resultados de este trabajo son confiables, los primeros modelos se calibraron con los reportados por Rivera (2006) y Tena *et al.* (2011).

Los elementos fueron modelados como elementos tipo cascarón grueso (shell thick), elásticos, lineales, homogéneos e isotrópicos, y con módulo de Poisson de 0.15 en ambos materiales, que fue el módulo empleado por los autores anteriormente citados. En cuanto a la aplicación de la fuerza lateral, se realizaron algunas pruebas con cuatro diferentes configuraciones de aplicación sobre el muro de tres niveles:

- En cada nodo a lo largo del muro (41 puntos de aplicación).
- Sobre cada nodo de la losa (369 puntos).
- En tres líneas de nodos, es decir, en extremos y centro del muro en su dimensión mayor (27 puntos).
- En tres líneas de nodos, pero únicamente en extremos y centro también en la dirección corta (9 puntos).

En la *figura 2.3* se observa que la variación fue apenas perceptible, del 0.3%, por lo que se optó por la configuración de 27 puntos de aplicación (líneas extremas y centro *figura 2.4*), dada su practicidad, y que se consideró que tomaría de manera razonable la influencia de la presencia de las losas.





Figura 2.3. Desplazamientos promedio según configuración de carga

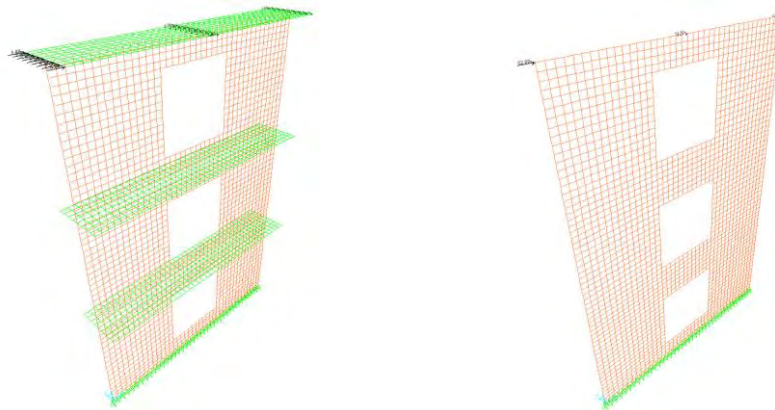


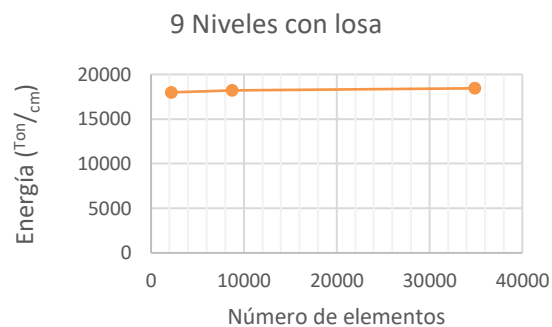
Figura 2.4. Configuraciones de aplicación de carga utilizados

Para asegurar que el mallado fuera el adecuado, se realizó también la comprobación del mallado mediante la energía que se desarrolla en los modelos a diferentes alturas y casos de sistema de piso en los muros simétricos. En la *figura 2.5*, el primer punto de cada curva representa un mallado con menos elementos a los utilizados a lo largo de este trabajo, el segundo punto es el mallado utilizado y el tercero es considerando un mallado más fino. Como se observa en la *Figura 2.5*, la energía se estabiliza entre el mallado utilizado (que coincide con el mallado empleado por Rivera en 2006) y el más fino. Esto se vuelve más evidente a medida que se incrementa la altura, por lo que consideramos que el mallado que se utilizó es adecuado.

Adicionalmente, se revisó que el ancho de losa equivalente seleccionado representara suficientemente la presencia de la losa. Esto se hizo con algunos muros simétricos de tres y nueve niveles que ya se tenían, mediante la comparación de desplazamientos de los modelos tal cual se han descrito, contra modelos con dos muros unidos por una losa con un claro de 8 metros (*figura 2.6a*), y tres muros unidos por losas, con claros de 4 y 8 metros (*Figura 2.6c y d*). La rigidez teórica de la losa se incluyó directamente en el modelado. Por ello, se consideraron los tres tipos de mampostería con la losa más rígida para las dos alturas mencionadas, y la losa más flexible únicamente para la mampostería más rígida. Las fuerzas laterales aplicadas fueron del doble, dado que se tenían dos muros, y se utilizó la misma configuración de aplicación. Se obtuvieron diferencias de entre 1.8% y 11.1% para muro más rígido con losa más flexible y

muro menos rígido con losa más rígida respectivamente en muros de tres niveles; y de 0.1% y 3.3% para los mismos casos en muros de nueve niveles cuando se comparan los modelos de dos muros. Dado que las diferencias más grandes se encuentran en la combinación mampostería flexible con losa rígida, los modelos de tres muros únicamente se compararon en dicha combinación, obteniendo diferencias de 7.8% y 13.7% en los claros de 4 y 8 metros respectivamente en los modelos de tres niveles, mientras que en los de nueve niveles tales valores se reducen a 2.3% y 4.1%. Los perfiles para la combinación con mayores diferencias se muestran en la (figura 2.7). Se observa que, efectivamente, los desplazamientos son representativos, que la flexibilidad del muro aumenta las diferencias, pero que se reducen conforme se incrementa la altura de los muros.

Para los modelos asimétricos (Figura 2.8b y c) no se realizó la comprobación de la malla, ya que las dimensiones del muro y de la abertura eran las mismas. Como ya se mencionó, únicamente se cambió la ubicación, por lo que el número de elementos sería el mismo y, por ende, no se consideró necesario realizar tal comprobación.



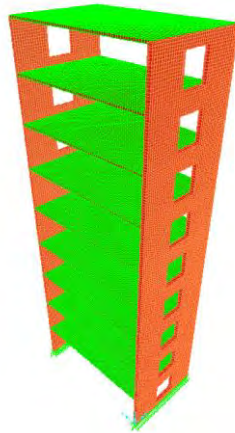
a) Curva de energía vs número de elementos de modelo de tres niveles sin losa

b) Curva de energía vs número de elementos de modelo de nueve niveles con losa

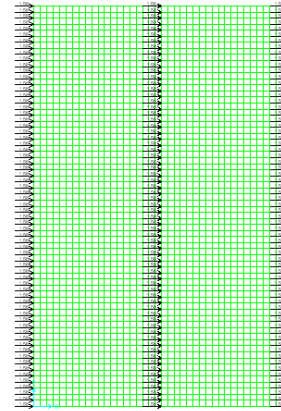


c) Curva de energía vs número de elementos de modelo de 18 niveles con losa

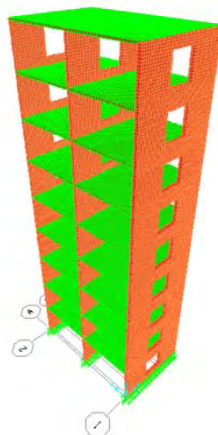
Figura 2.5. Selección de mallado adecuado en muros simétricos



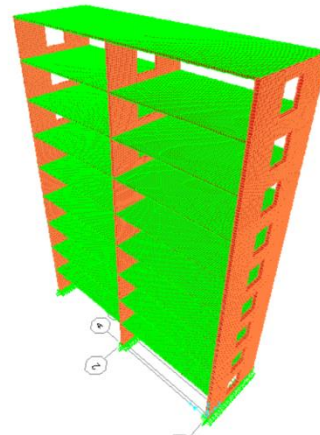
a) Modelo en 3D



b) Configuración de carga en planta



c) Claros de 4m



d) Claros de 8m

Figura 2.6. Modelos de nueve niveles con dos y tres muros

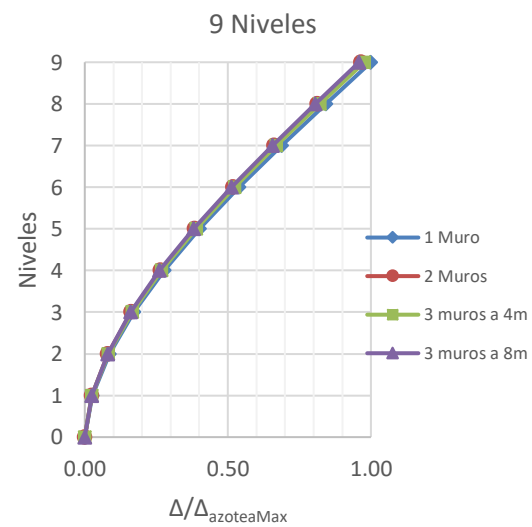
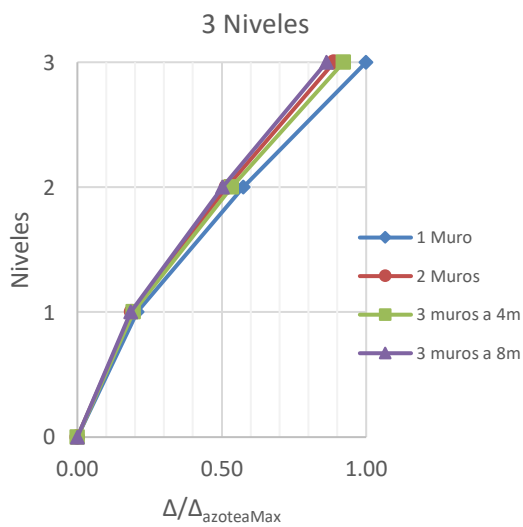
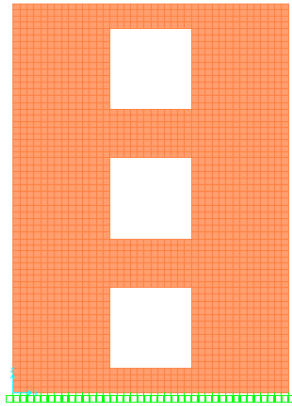
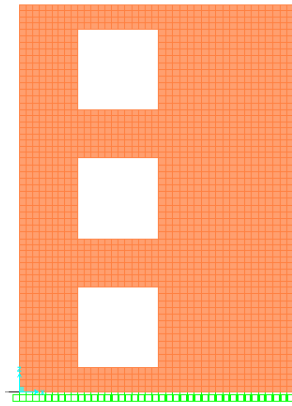


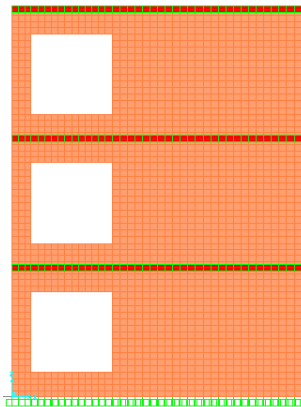
Figura 2.7. Comparación de perfiles de desplazamiento de modelos con uno, dos y tres muros con  $E=12\text{ton/cm}^2$  y losa  $300\text{ ton/cm}^2$



a) Muro simétrico de tres niveles sin losa



b) Muro con abertura excéntrica del 40% de tres niveles sin losa



c) Muro con abertura excéntrica del 82% de tres niveles con losa

Figura 2.8. Patrones de aberturas utilizados en muros de una sola fila de aberturas

## 2.2. Aproximaciones obtenidas con métodos simplificados

Los métodos simplificados que se evaluaron en este trabajo fueron desarrollados para estimar los desplazamientos laterales en muros acoplados por vigas o losas. Lo que se pretende en este trabajo es evaluar si se obtienen buenas aproximaciones para muros con aberturas utilizando métodos simplificados dónde se discretizan como si fueran dos muros acoplados.

Para estimar los desplazamientos de los muros con los métodos simplificados, se realizó:

- Una hoja de cálculo en Mathcad para el método propuesto por Coull y Choudhury (1967) según la adaptación de Rivera (2006), utilizando las ecuaciones 1.1, 1.3 y 1.4, según lo ilustrado en la figura 2.9.a.
- Un pequeño programa en MATLAB para el método del marco equivalente más comúnmente empleado en México, donde se consideran las propiedades de las secciones brutas para los muros y se discretizan las zonas de rigidez infinita de la unión “viga-columna” en las vigas, figura 2.9b.

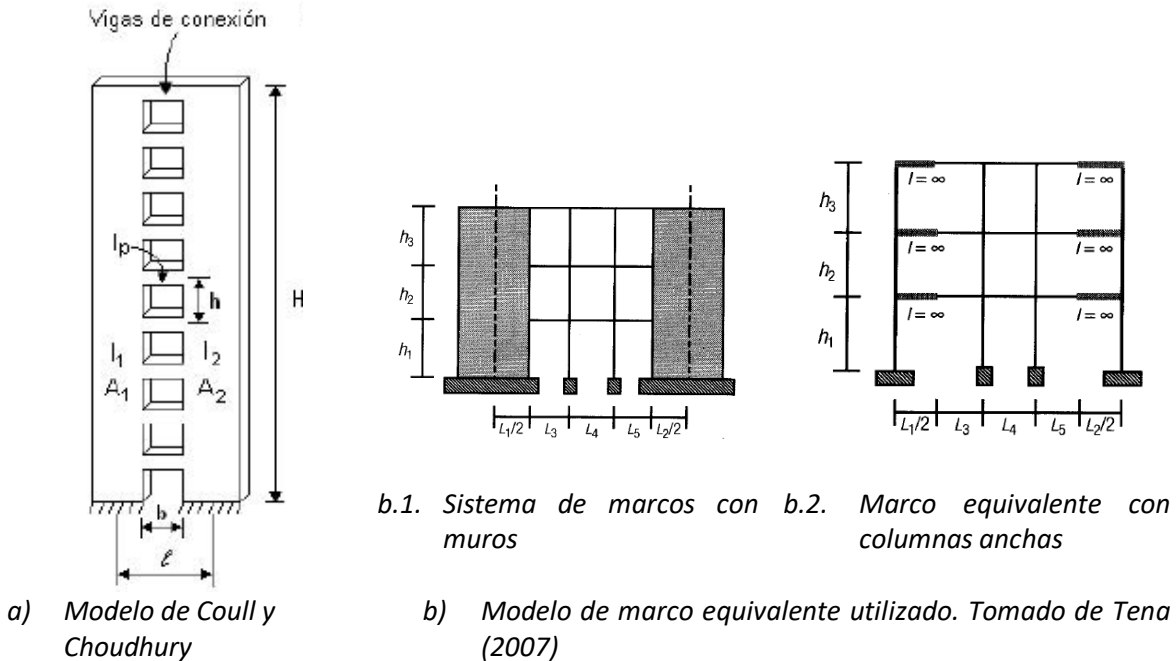


Figura 2.9. Modelos utilizados para cada método de análisis

Ambos métodos utilizan las secciones brutas de los muros en los cálculos, por lo que únicamente se fueron variando éstas para las evaluaciones. Los muros se supusieron de mampostería de piezas sólidas sin elementos confinantes (dadas y castillos) Por lo tanto, en estos métodos se discretiza al muro como si se tratara de dos muros acoplados por vigas muy peraltadas.

Para la consideración de las losas en ambos métodos, se calculó la inercia de las “vigas” de la figura 2.10 con la sección transformada, dado que se tenía una parte de muro y la parte correspondiente de la losa. La carga en el método de Coull y Choudhury (CC) se considera directamente en el valor de P. En el caso del marco equivalente (MEQ), esta se aplicó en los dos nodos del nivel de azotea.

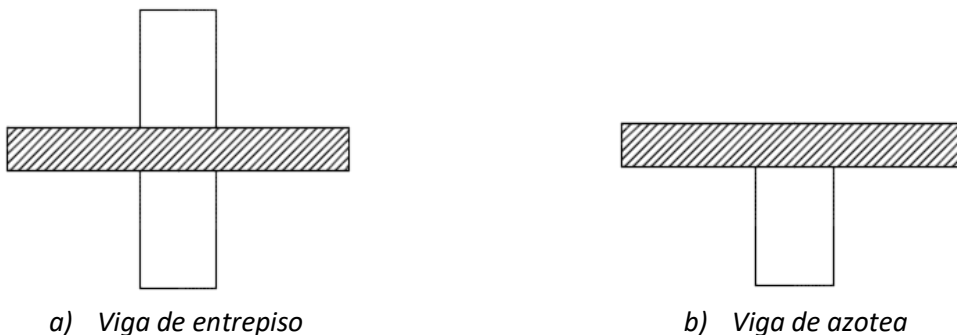


Figura 2.10. Vigas de acoplamiento utilizadas en los métodos simplificados

## 2.3. Análisis de resultados

### 2.3.1. Muros simétricos

Una vez que se obtuvieron las aproximaciones con los tres métodos, se graficaron los perfiles de desplazamiento laterales de todos los muros (*Apéndice D*), normalizando respecto a las obtenidas con el MEF.

Se observa a partir de la *Figura 2.11* que, para ambos métodos simplificados, las aproximaciones obtenidas no son buenas, la mejor de ellas es del 68% y se obtiene con el método del marco equivalente (MEQ) cuando se combinan el muro más flexible con la losa más rígida, mientras que con Coull y Choudhury (CC) la mejor es del 53% para el mismo muro. Ambos métodos muestran las tendencias de aproximación muy claras cuando se comparan todos los casos.

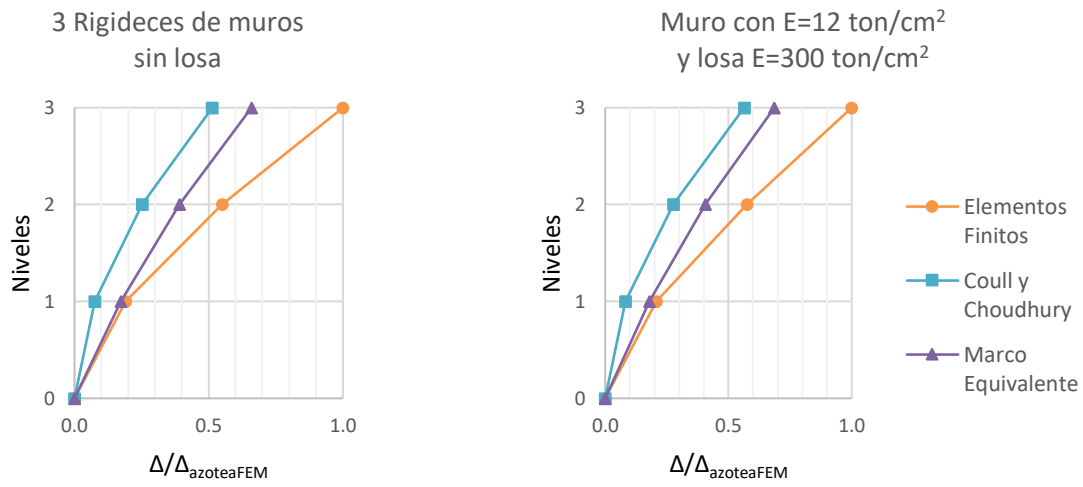
De la observación de la *Figura 2.12* se aprecia que para los modelos de seis niveles se mejoran las aproximaciones, dando del 75% al 79% con CC y 92% al 95% con el MEQ. De igual forma, los dos métodos muestran tendencias de aproximación muy claras.

Para los modelos de nueve niveles (*Figura 2.13*) se obtienen intervalos del 105% (todos los muros excepto los menos rígidos con los cuatro casos de losa más rígida), al 107% con el MEQ, mientras que CC da aproximaciones del 86% al 89%. Igualmente, se observa claramente la tendencia de los dos métodos.

Para los modelos de doce niveles, se aprecia en la *Figura 2.14* que con el MEQ se obtienen aproximaciones de 110% (todos los muros excepto los menos rígidos con los dos casos de losa más rígida tienen valores del 110%-111%) al 112% (es decir, se sobrestiman los desplazamientos de un 10% al 12%), y con el método CC se obtienen aproximaciones entre el 92% y 93%. Nuevamente, se aprecian claras similitudes entre los dos métodos.

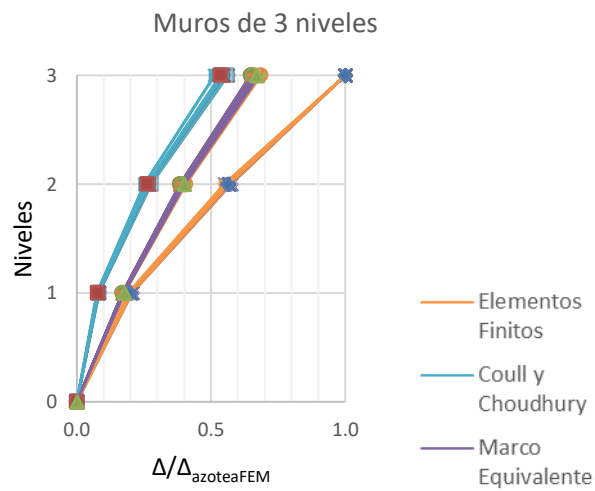
La sobreestimación del MEQ varía entre el 13% y el 15% para los modelos de 15 niveles (*Figura 2.15*), mientras que con el método de CC se tienen aproximaciones del 95% (todos los muros excepto los menos rígidos con los cuatro casos de losa más rígida), al 96%. De igual manera, tienden a coincidir las estimaciones entre ambos métodos.

Finalmente, las aproximaciones obtenidas para los modelos de 18 niveles oscilan entre el 115% y 116% con el MEQ y entre el 96% y 97% con el método de CC (*Figura 2.16*). Nuevamente, se observa cómo las estimaciones de ambos métodos tienden a coincidir.



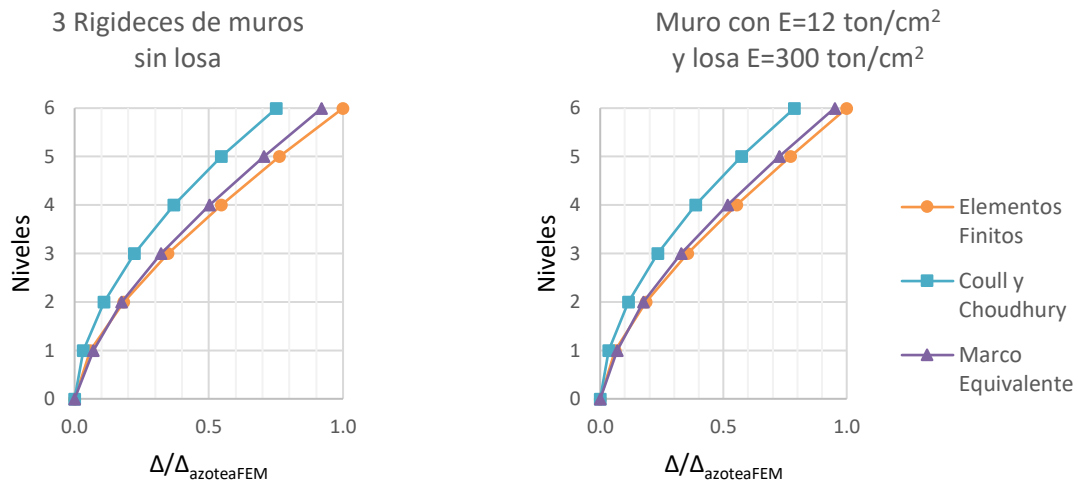
a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



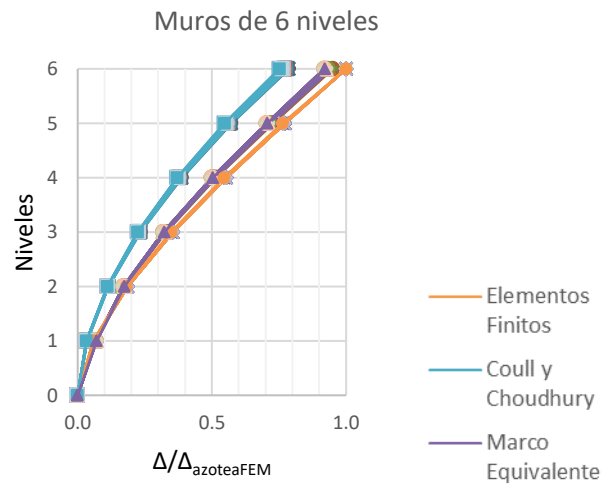
c) 21 casos de tres niveles

Figura 2.11. Comparación de aproximaciones de muros simétricos de tres niveles con los tres métodos revisados



a) Casos con menores aproximaciones

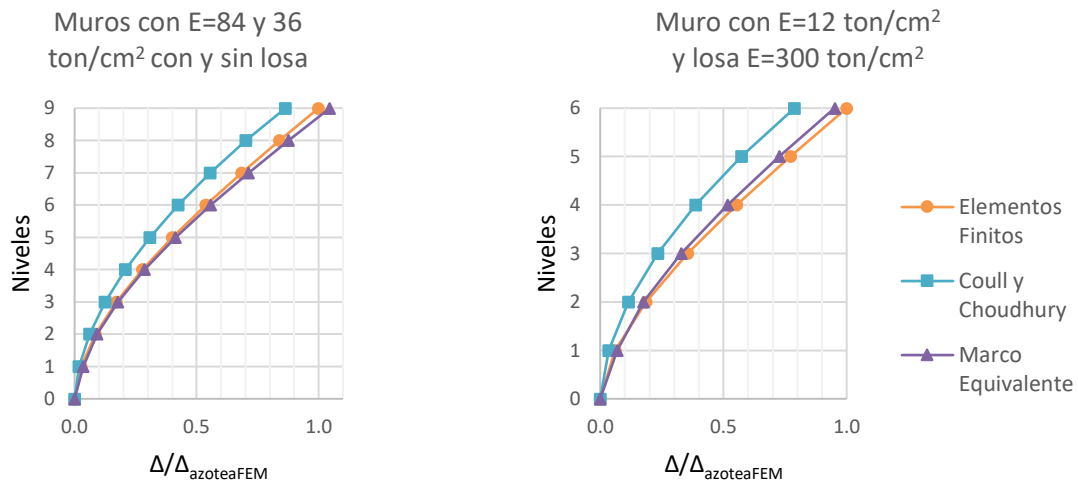
b) Caso con mayores aproximaciones



c) 21 casos de seis niveles

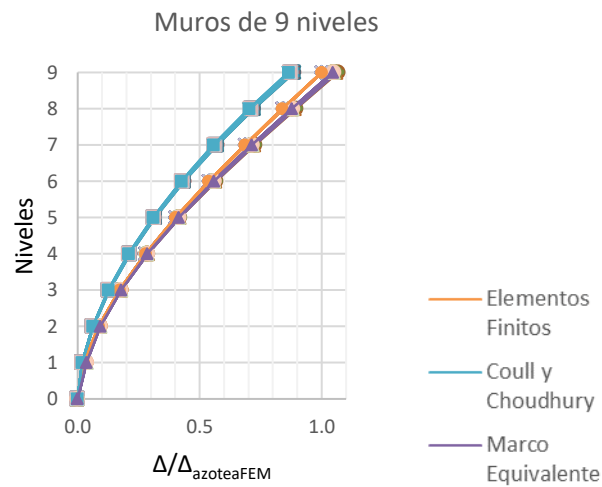
Figura 2.12. Comparación de aproximaciones de muros simétricos de seis niveles con los tres métodos revisados





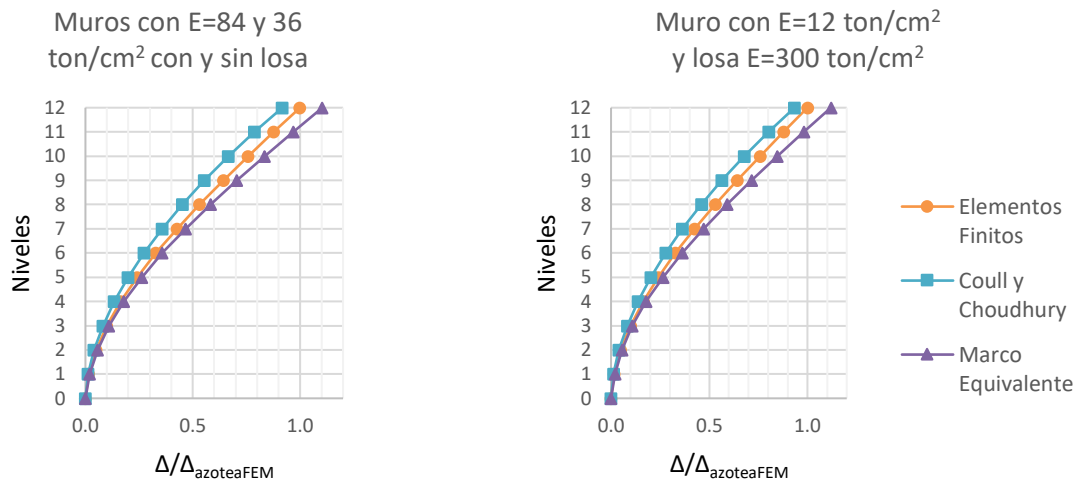
a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



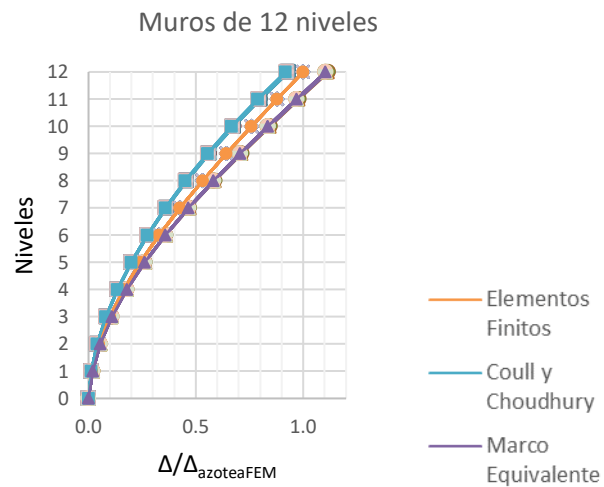
c) 21 casos de nueve niveles

Figura 2.13. Comparación de aproximaciones de muros simétricos de nueve niveles con los tres métodos revisados



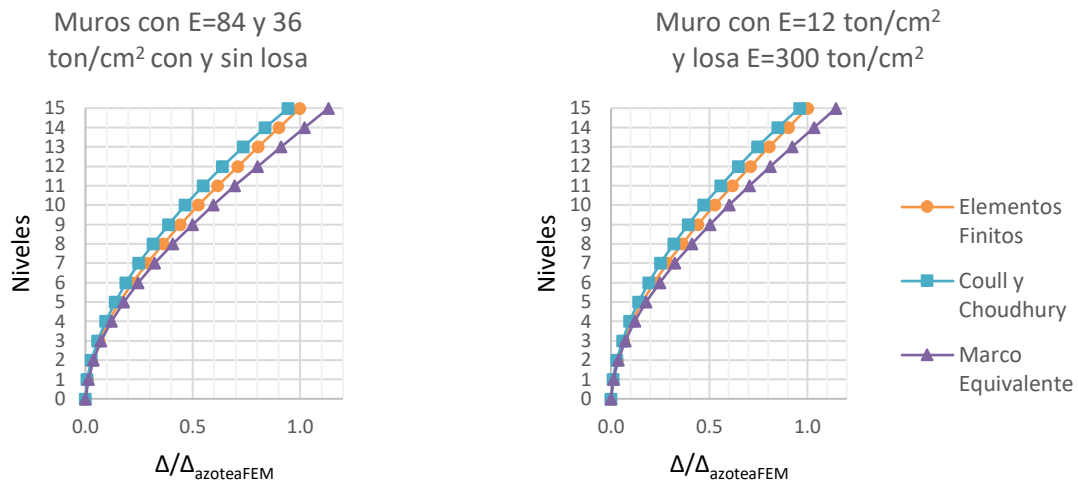
a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



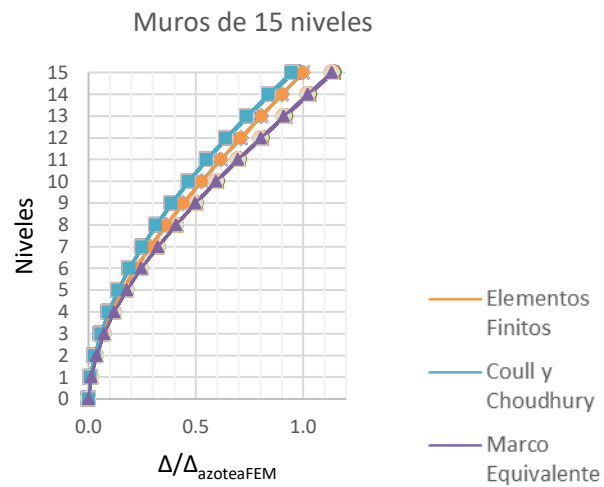
c) 21 casos de 12 niveles

Figura 2.14. Comparación de aproximaciones de muros simétricos de 12 niveles con los tres métodos revisados



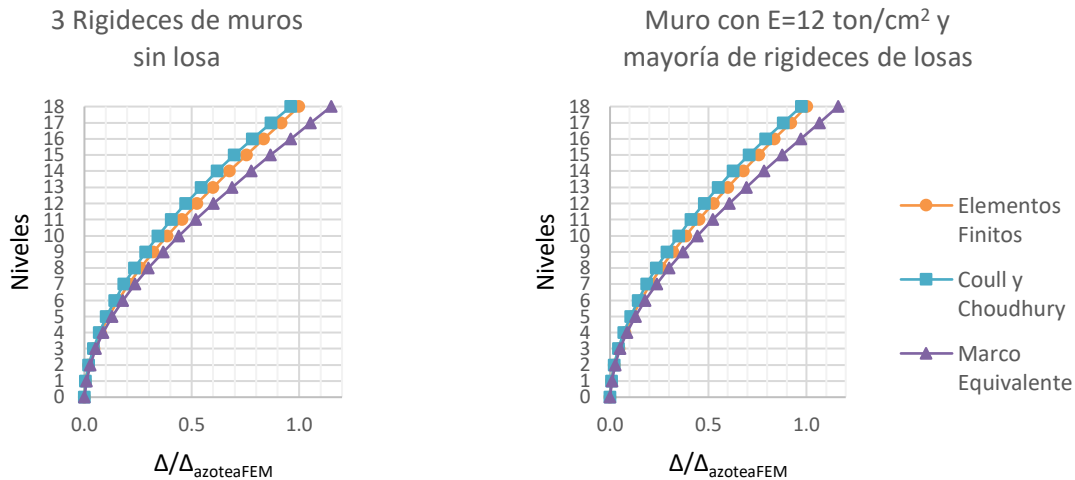
a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



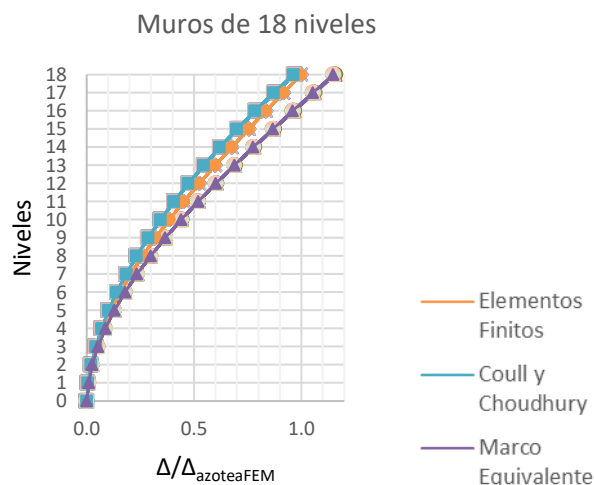
c) 21 casos de 15 niveles

Figura 2.15. A Comparación de aproximaciones de muros simétricos de 15 niveles con los tres métodos revisados



a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



c) 21 casos de 18 niveles

Figura 2.16. Comparación de aproximaciones de muros simétricos de 18 niveles con los tres métodos revisados

#### Observaciones generales

A partir del análisis de todos los resultados obtenidos y discutidos brevemente anteriormente, se pueden formular las siguientes observaciones generales:

- A medida que el muro se vuelve más flexible, la precisión de los métodos mejora, dando mejores aproximaciones para la combinación del muro más flexible con losa más rígida para cada caso de análisis.
- A partir de nueve niveles, con el método del MEQ se empiezan a sobreestimar los desplazamientos.
- El hecho de considerar la rigidez de la losa en los muros simétricos no hace gran diferencia, incluso con el método de los elementos finitos (MEF) cuando se consideran los dos tipos de mampostería más rígidas, de manera que, en dichos casos, la

restricción impuesta por el sistema de piso es despreciable. Por otra parte, la rigidez de las losas es de consideración con el MEF para todas las alturas cuando se considera la mampostería más flexible, lo que no se refleja en los métodos simplificados, por lo que es necesario tomar en cuenta el sistema de piso en el MEF y tratar de ajustar las aproximaciones obtenidas con los métodos simplificados.

- El método del marco equivalente (MEQ) es un poco más sensible a la presencia del sistema de piso, pero sin impactar de manera importante, como ya se mencionó.
- Cabe mencionar que la precisión de los dos métodos aproximados en estudio (MEQ y CC) no cambia cuando se flexibiliza el muro, si no se considera el sistema de piso.
- Ambos métodos (MEQ y CC) tienen tendencias de aproximación muy marcadas, que se definen aún mejor conforme se aumenta la altura, dado que ya no impactan de manera importante las deformaciones por cortante.

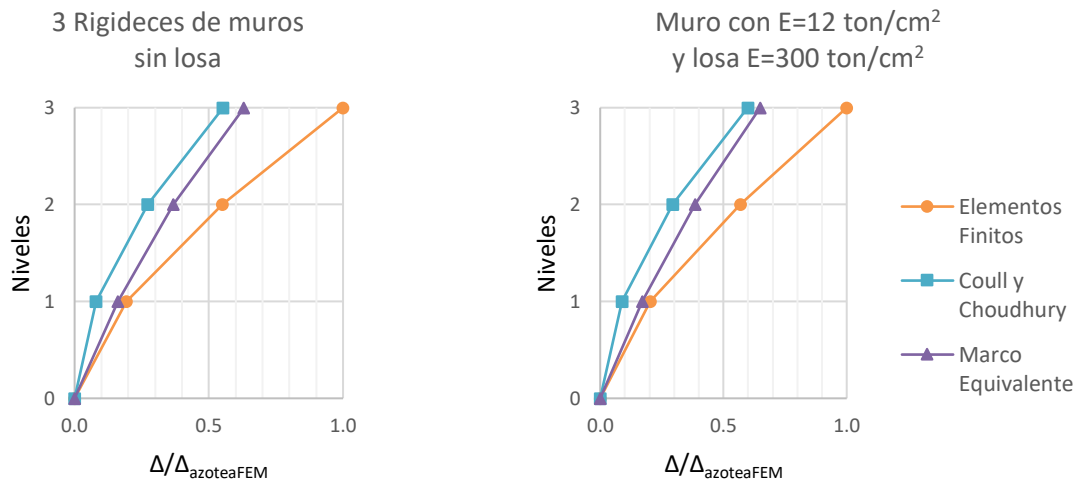
### 2.3.2. Muros asimétricos

#### 2.3.2.1. Muros con abertura excéntrica del 40%

Se observa para los muros de tres niveles (*Figura 2.17*) que la excentricidad empieza a influir en la precisión de los métodos simplificados, en comparación a los muros simétricos. Las aproximaciones obtenidas con el método del MEQ empeoran, mientras que las obtenidas con el método de CC mejoran. La mejor aproximación es del 65% con el método del MEQ para la misma combinación que en los muros simétricos (muro más flexible con la losa más rígida), mientras que con el método de CC ahora la mejor aproximación es del 60% para el mismo muro. Los dos métodos (MEQ y CC) tienden a coincidir entre sí para los desplazamientos máximos.

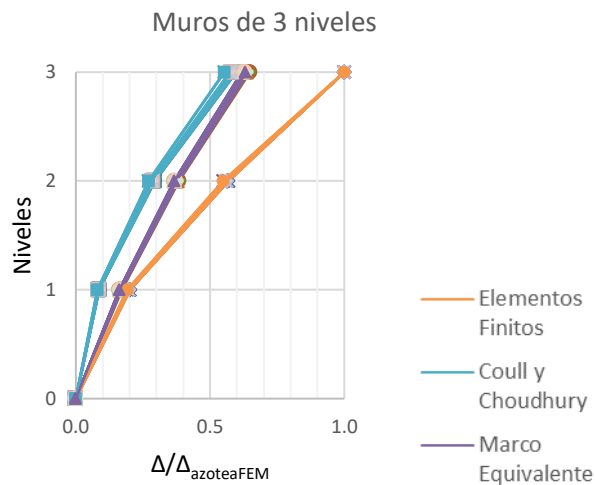
Para los muros de seis niveles (*Figura 2.18*), se mejoran las aproximaciones, variando entre el 79% y el 82% con el método de CC y entre el 80% y 83% con el método del MEQ. Se observa nuevamente que las curvas se aproximan entre sí hasta casi coincidir en la estimación del desplazamiento máximo.

Cuando el muro tiene nueve niveles (*Figura 2.19*) se obtienen aproximaciones del 89% al 91% con el método de CC, mientras que con el método del MEQ se obtienen aproximaciones del 88% al 90%. Para los muros de 12 niveles (*Figura 2.20*), las aproximaciones con el método de CC van del 93% al 95%, mientras que con el método del MEQ oscilan entre el 92% y 93%. En los muros de 15 niveles (*Figura 2.21*), las aproximaciones obtenidas son del 96% al 97% con el método de CC, mientras que con el método del MEQ están entre el 93% y 94%. Para los muros de 18 niveles (*Figura 2.22*), se obtienen aproximaciones del 97% al 98% con el método de CC y entre 94% y 95% con el método del MEQ. Las curvas obtenidas para ambos métodos se asemejan más a medida que se incrementa la altura, hasta que prácticamente todas las curvas coinciden para los modelos de 15 y 18 niveles (*Figura 2.21* y *Figura 2.22*).



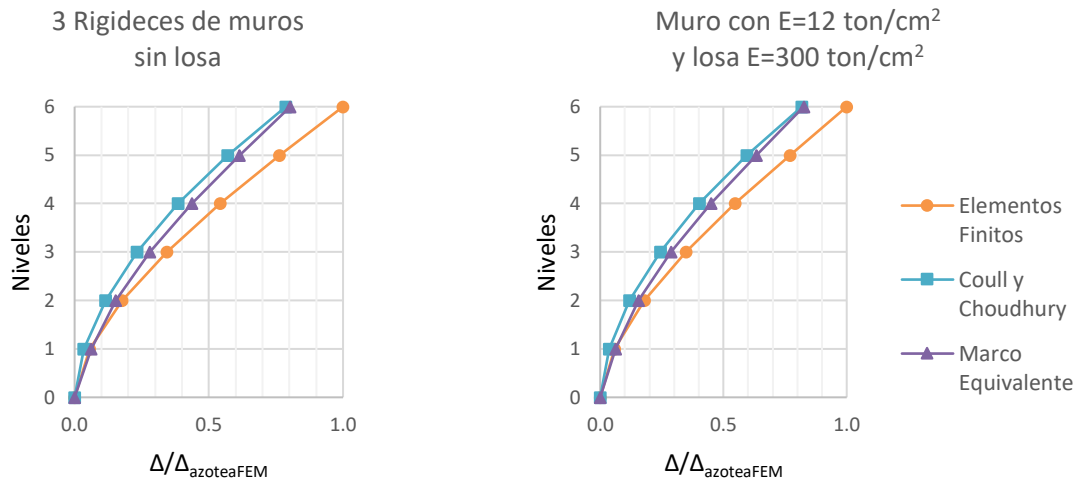
a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



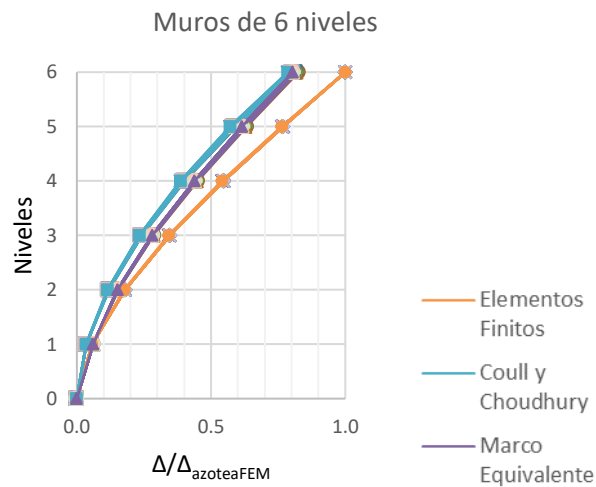
c) 21 casos de tres niveles

Figura 2.17. Comparación de aproximaciones de muros de tres niveles con una sola fila de aberturas con excentricidad del 40%



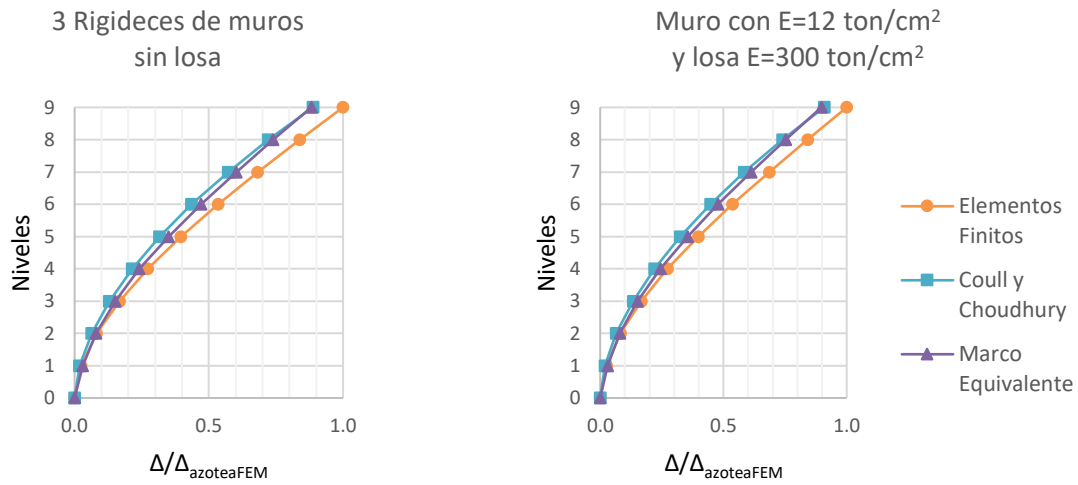
a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



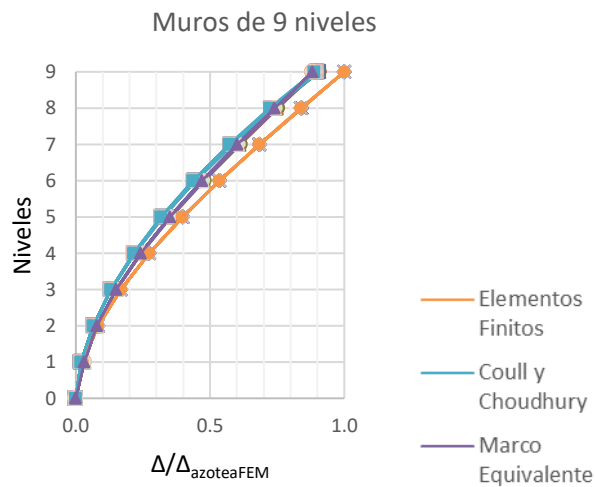
c) 21 casos de seis niveles

Figura 2.18. Comparación de aproximaciones de muros de seis niveles con una sola fila de aberturas con excentricidad del 40%



a) Casos con menores aproximaciones

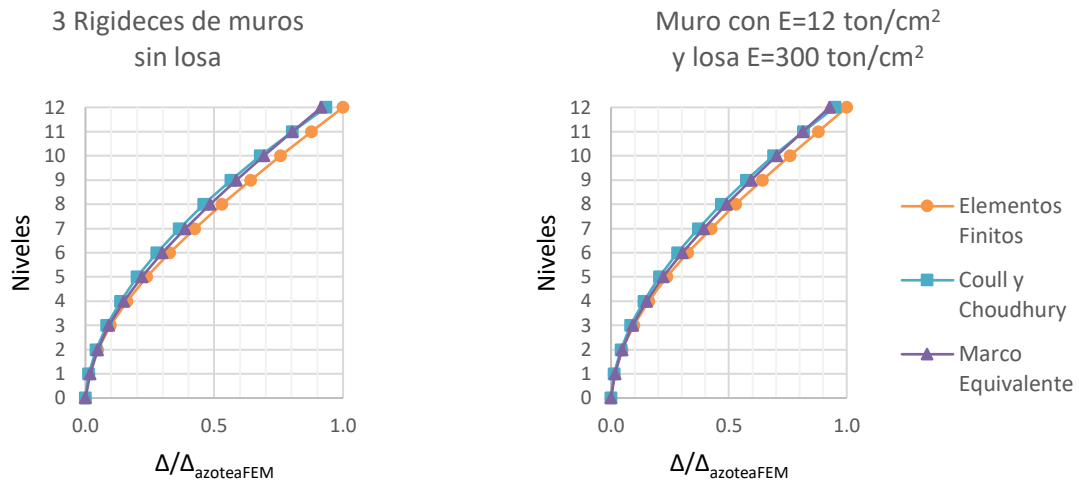
b) Caso con mayores aproximaciones



c) 21 casos de nueve niveles

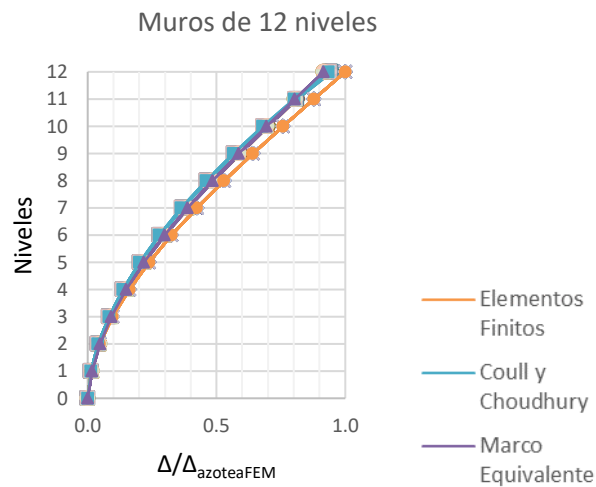
Figura 2.19. Comparación de aproximaciones de muros de nueve niveles con una sola fila de aberturas con excentricidad del 40%





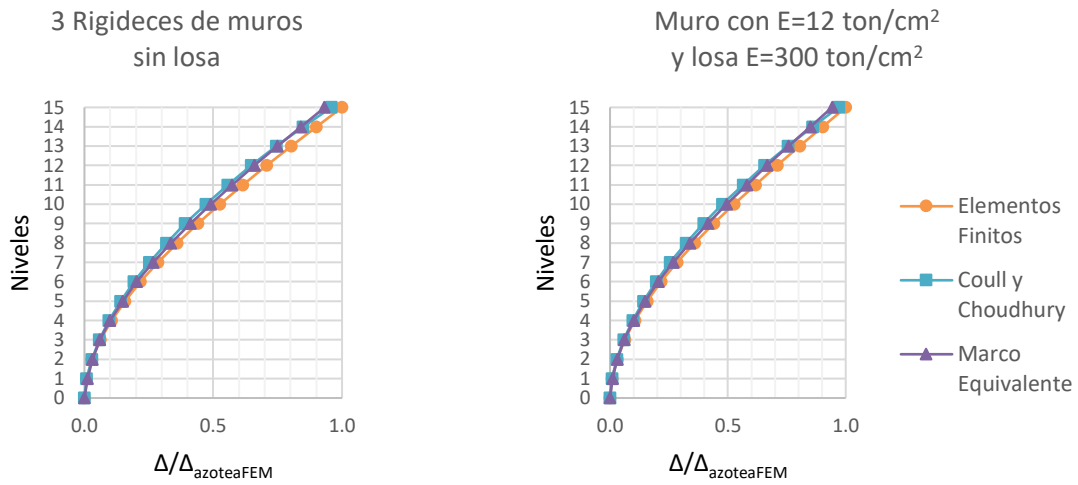
a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



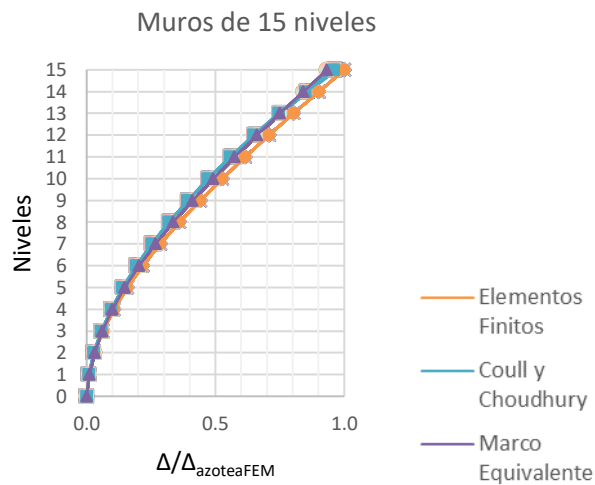
c) 21 casos de 12 niveles

Figura 2.20. Comparación de aproximaciones de muros de 12 niveles con una sola fila de aberturas con excentricidad del 40%



a) Casos con menores aproximaciones

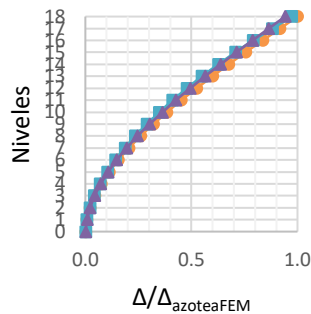
b) Caso con mayores aproximaciones



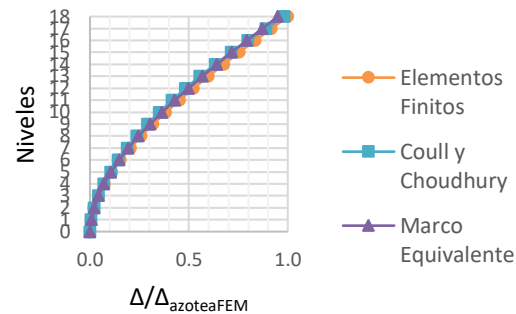
c) 21 casos de 15 niveles

Figura 2.21. Comparación de aproximaciones de muros de 15 niveles con una sola fila de aberturas con excentricidad del 40%

3 Rigideces de muros  
sin losa



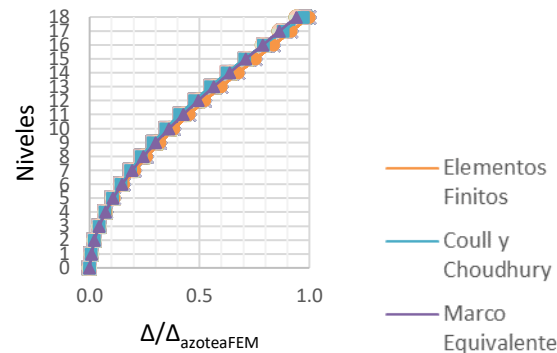
Muros con  $E=12 \text{ ton/cm}^2$   
y losa  $E=300 \text{ ton/cm}^2$



a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones

Muros de 18 niveles



c) 21 casos de 18 niveles

Figura 2.22. Comparación de aproximaciones de muros de 18 niveles con una sola fila de aberturas con excentricidad del 40%

#### Observaciones generales

A partir del análisis de todos los resultados obtenidos y discutidos brevemente anteriormente, se pueden formular las siguientes observaciones generales:

- A medida que el muro se vuelve más flexible, la precisión de los métodos mejora, dando aproximaciones más cercanas para la combinación del muro más flexible con losa más rígida para cada caso de análisis.
- A partir de nueve niveles, las aproximaciones obtenidas con los métodos simplificados (CC y MEQ) son similares a las obtenidas con el MEF.
- De manera similar que con los muros simétricos, el hecho de considerar la rigidez de la losa no hace gran diferencia, incluso con el MEF cuando se consideran los dos tipos de mampostería más rígidas, de manera que, en dichos casos, la restricción del sistema de piso al movimiento pudiera no considerarse. Aunque para este tipo de muros, la rigidez de las losas tiene menor impacto con MEF cuando se considera la mampostería más flexible, empieza a ser relevante a partir de los 12 niveles. De igual manera, tampoco se refleja en los métodos simplificados (MEQ y CC), por lo que es necesario tomar en

cuenta el sistema de piso en MEF y tratar de ajustar las aproximaciones obtenidas con los métodos simplificados.

- El método del marco equivalente (MEQ) es un poco más sensible a la presencia del sistema de piso, pero sin influir de manera importante, como ya se mencionó.
- Cabe mencionar que la precisión de los dos métodos (MEQ y CC) no cambia cuando se flexibiliza el muro, si no se considera el sistema de piso.
- Los perfiles de desplazamientos laterales obtenidos para ambos métodos (MEQ y CC) se asemejan más a medida que se incrementa la altura, hasta que prácticamente coinciden para los modelos de 15 y 18 niveles.

#### 2.3.2.2. Muros con abertura excéntrica del 82%

Al incrementar la excentricidad, las aproximaciones obtenidas con el método de CC tienden a mejorar, mientras que las del método del MEQ tienden a empeorar. De hecho, para los muros de tres y seis niveles (*Figura 2.23 y Figura 2.24*), las curvas obtenidas con el método del MEQ empiezan a perder precisión a medida que se considera y rigidiza el sistema de piso.

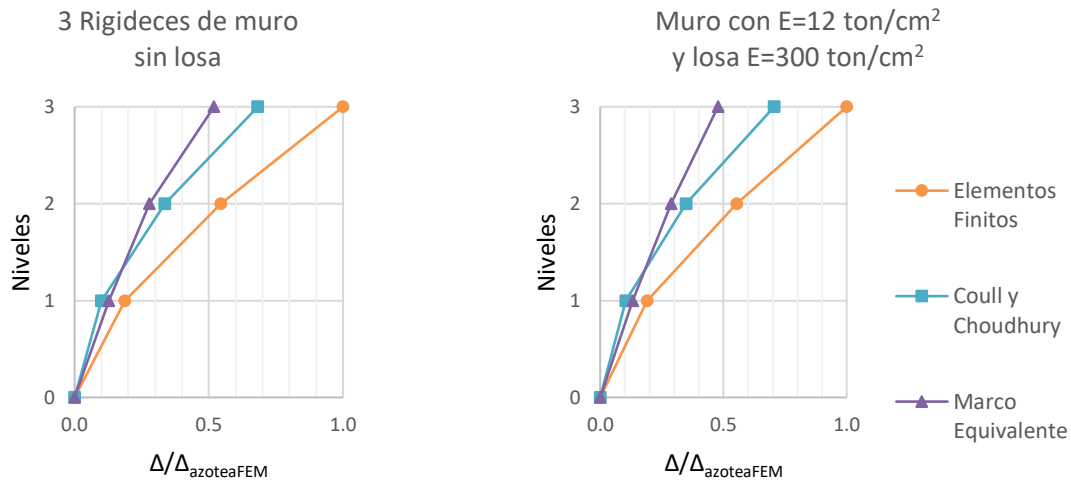
Para los muros de tres niveles (*Figura 2.23*), la mejor aproximación es del 71% y se obtiene con el método de CC y la combinación muro más flexible con losa más rígida, a diferencia del método del MEQ, donde ahora la mejor aproximación se redujo al 52%, y resulta en los muros que no consideran el sistema de piso.

Para los muros de seis niveles (*Figura 2.24*), se obtienen aproximaciones del 89% al 90% con el método de CC para la combinación muro más flexible con losa más rígida y 48% con el método del MEQ cuando no se considera la losa, aunque se tiene una diferencia de 0.02% entre la mejor y la peor aproximación en este método, que es cuando se considera la losa. En el caso del método de CC podemos decir que, a partir de seis niveles, las aproximaciones son similares a las obtenidas con el MEF.

Cuando el muro tiene nueve niveles (*Figura 2.25*) se obtienen aproximaciones entre el 96% y 97% con el método de CC, prácticamente las mismas que se obtienen con el MEF. Por su parte, con el método del MEQ empieza a ser constantes (estabilizarse) a partir de nueve niveles porque el impacto de las deformaciones por cortante de los muros disminuye, obteniéndose aproximaciones de tan sólo el 47% y 48%.

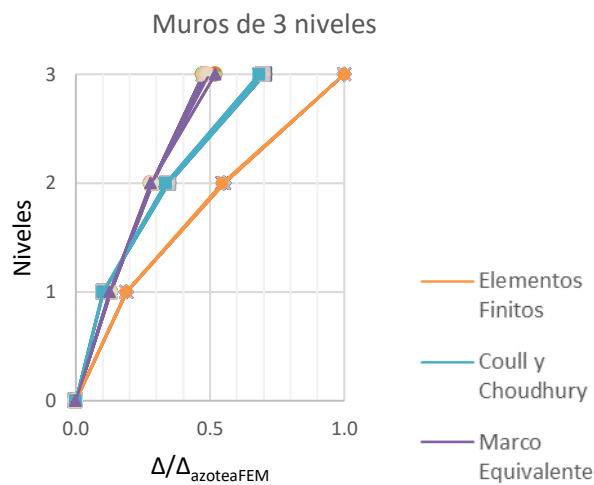
En el caso de los muros de 12 niveles (*Figura 2.26*), las aproximaciones con el método de CC son del 99% al 100%, mientras que con el MEQ andan alrededor del 47% para todos los casos. Para los muros de 15 niveles (*Figura 2.27*), las aproximaciones obtenidas oscilan entre el 100% y 101% con el método de CC, es decir, son prácticamente exactas cuando se comparan con el MEF (prácticamente se superponen las curvas obtenidas con el método de CC y con el MEF), mientras que con el método del MEQ siguen siendo pobres y permanecen alrededor del 47%. Finalmente, cuando se tienen 18 niveles (*Figura 2.28*), se obtienen aproximaciones entre el 101% y 102% con el método de CC (nuevamente se superponen las curvas obtenidas con CC y

con el MEF) y con el método del MEQ no se obtienen grandes cambios, se sigue obteniendo una aproximación muy pobre, de alrededor del 47%.



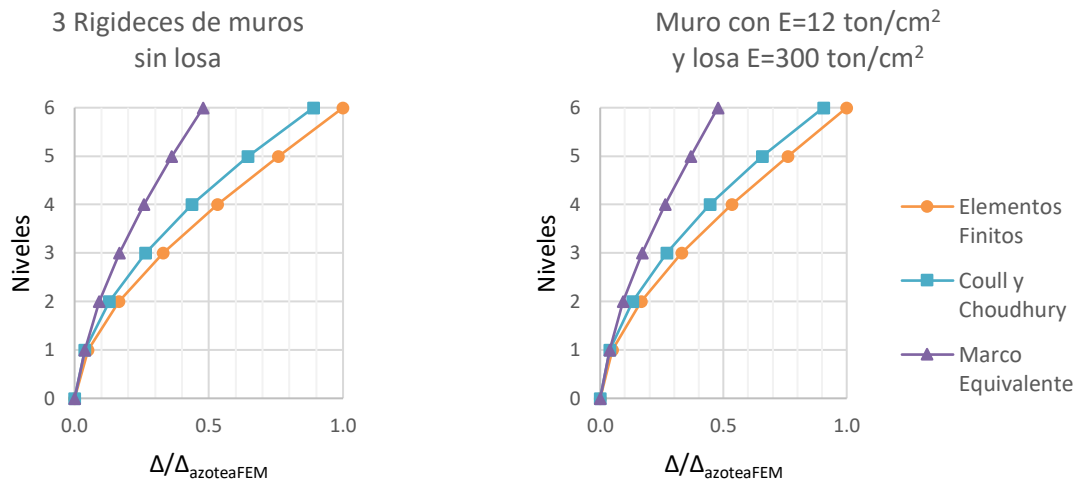
a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



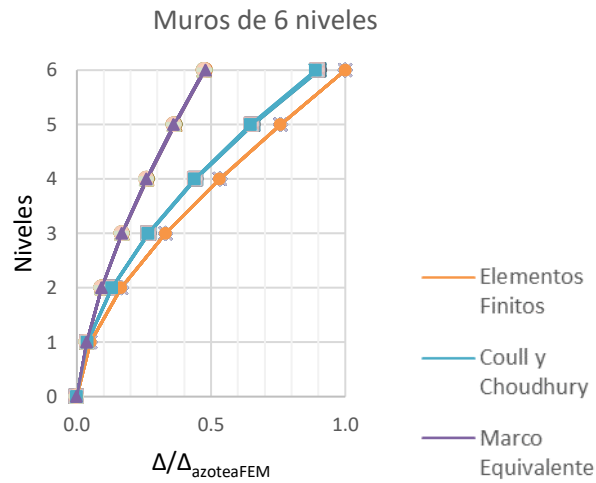
c) 21 casos de tres niveles

Figura 2.23. Comparación de aproximaciones de muros de tres niveles con una sola fila de aberturas con excentricidad del 82%



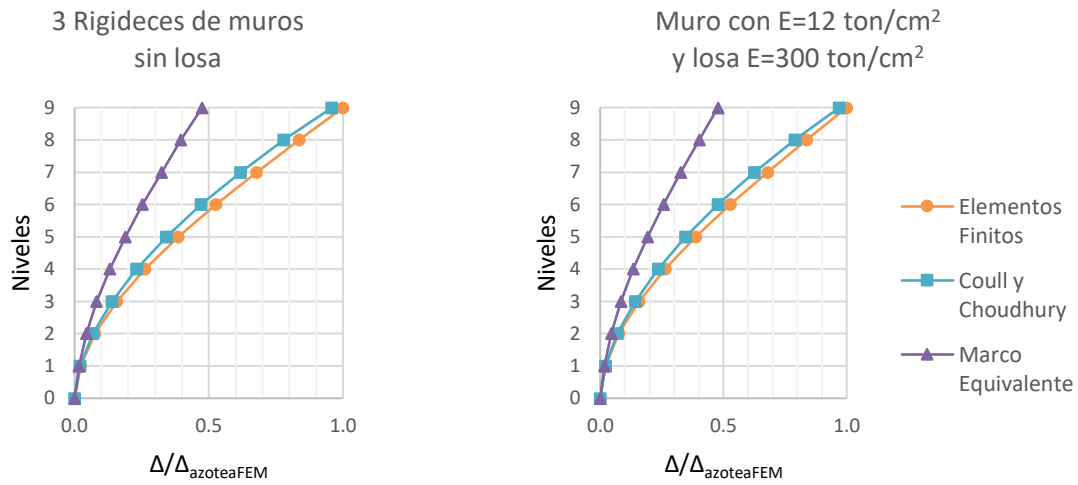
a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



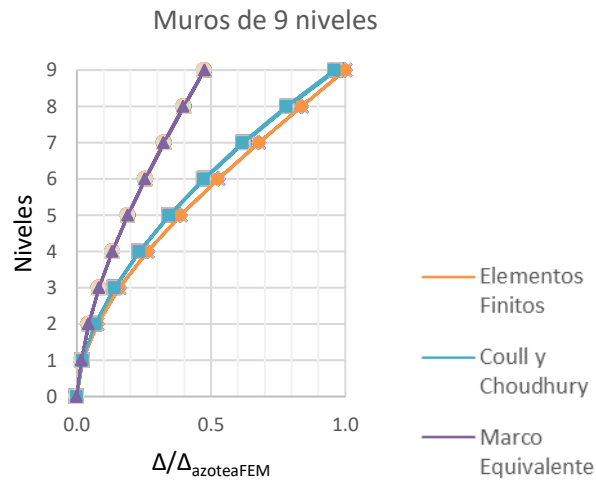
c) 21 casos de seis niveles

Figura 2.24. Comparación de aproximaciones de muros de seis niveles con una sola fila de aberturas con excentricidad del 82%



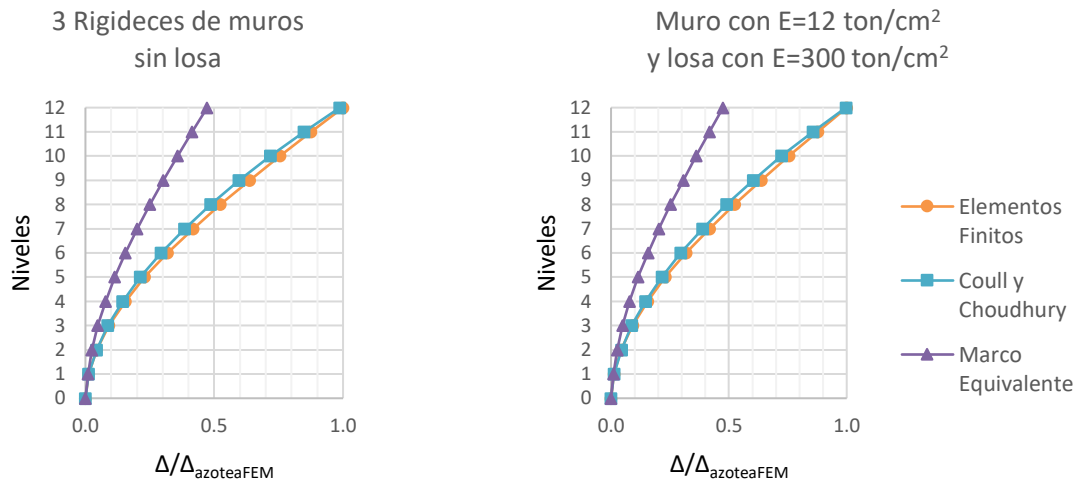
a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



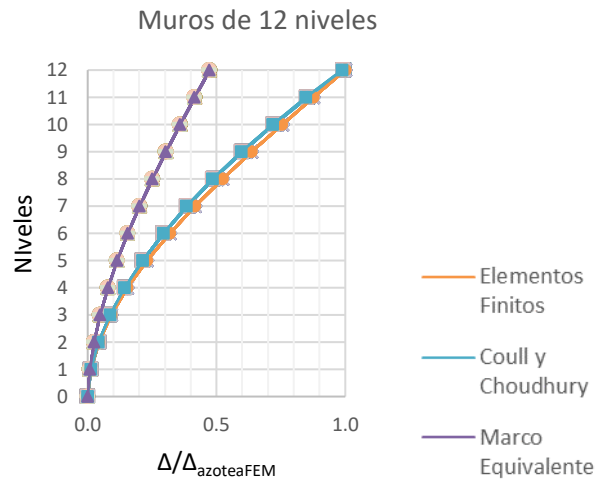
c) 21 casos de nueve niveles

Figura 2.25. Comparación de aproximaciones de muros de nueve niveles con una sola fila de aberturas con excentricidad del 82%



a) Casos con menores aproximaciones

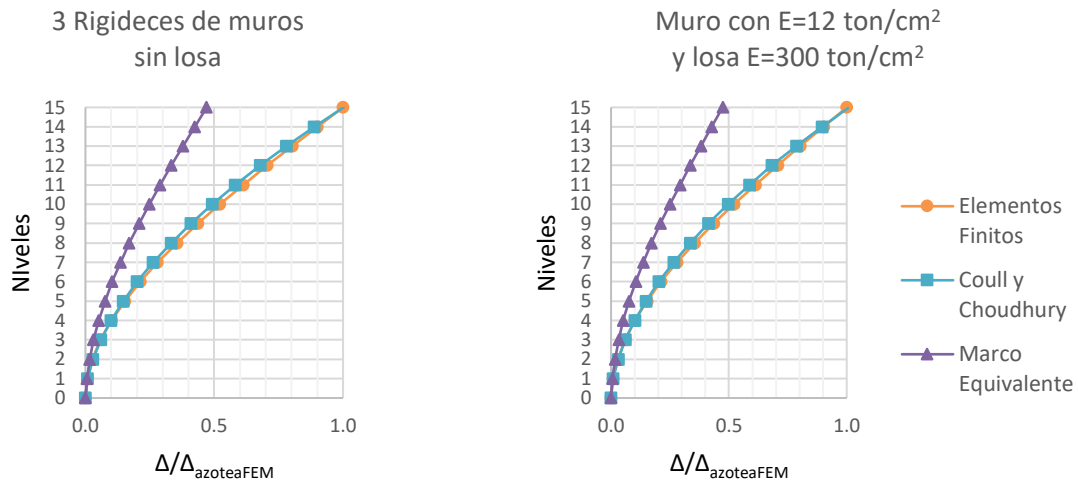
b) Caso con mayores aproximaciones



c) 21 casos de 12 niveles

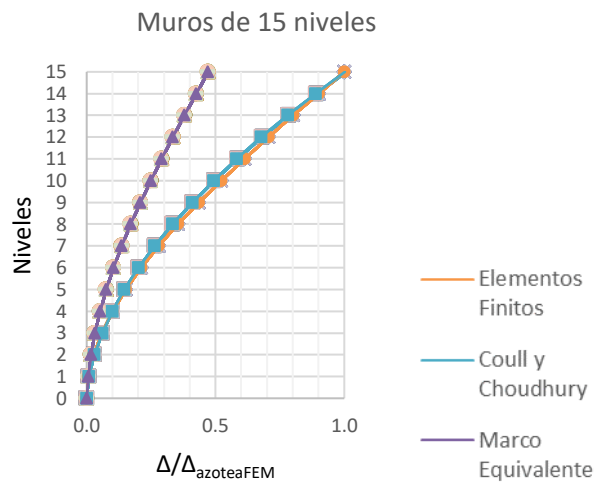
Figura 2.26. Comparación de aproximaciones de muros de 12 niveles con una sola fila de aberturas con excentricidad del 82%





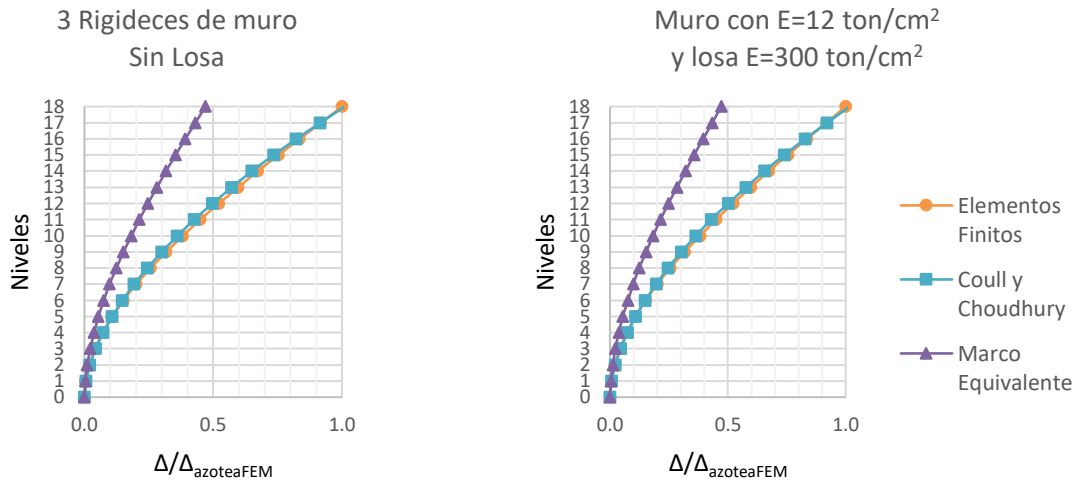
a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



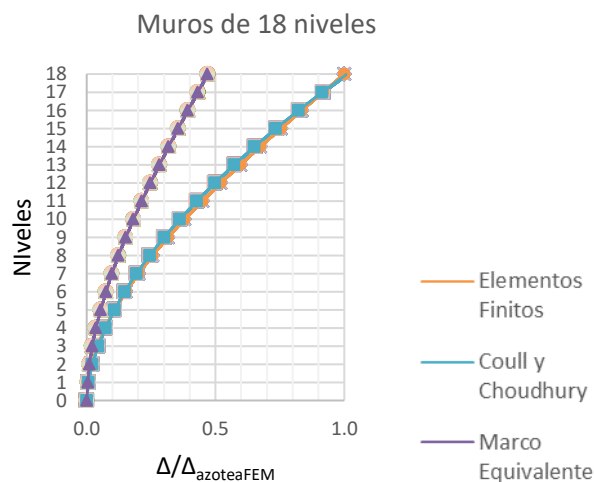
c) 21 casos de 15 niveles

Figura 2.27. Comparación de aproximaciones de muros de 15 niveles con una sola fila de aberturas con excentricidad del 82%



a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



c) 21 casos de 18 niveles

Figura 2.28. Comparación de aproximaciones de muros de 18 niveles con una sola fila de aberturas con excentricidad del 82%

#### Observaciones generales

A partir del análisis de todos los resultados obtenidos y discutidos brevemente anteriormente, se pueden formular las siguientes observaciones generales:

- A medida que el muro se vuelve más flexible, la precisión del método de CC mejora, obteniéndose mejores aproximaciones para la combinación del muro más flexible con losa más rígida para cada caso de análisis.
- A partir de seis niveles, con el método de CC se obtienen aproximaciones muy cercanas a las obtenidas con el MEF.

- De manera similar que con casos anteriores, el hecho de considerar la rigidez de la losa, no hace gran diferencia, incluso con el MEF, cuando se consideran los dos tipos de mampostería más rígidas, de manera que, en dichos casos, la restricción del sistema de piso al movimiento pudiera no considerarse. Aunque para este tipo de muros, la rigidez de las losas tiene menor impacto con el MEF cuando se considera la mampostería más flexible, empieza a ser relevante a partir de los 15 niveles. De igual manera, tampoco se refleja en los métodos simplificados, por lo que es necesario tomar en cuenta el sistema de piso en el MEF y tratar de ajustar las aproximaciones obtenidas con los métodos simplificados.
- En este tipo de muros se observa que el método del MEQ no funciona bien porque se obtienen aproximaciones muy pobres. Para todos los casos, los desplazamientos calculados son del orden de la mitad de los obtenidos con el MEF. No hay cambio significativo en las aproximaciones con el cambio de altura, ni de las propiedades de los muros o la losa.
- En el caso del método de CC se puede decir que, a partir de seis niveles, las aproximaciones obtenidas con respecto al MEF son prácticamente exactas.
- Cabe mencionar que la precisión de los dos métodos (CC y MEQ) no cambia significativamente cuando se flexibiliza el muro si no se considera el sistema de piso.
- El considerar la rigidez que aporta el sistema de piso empieza a tener influencia a medida que los muros se vuelven más flexibles cuando se emplea el MEF, ya sea con la rigidez del propio muro, de la altura, de la ubicación de las aberturas o el tamaño de las aberturas.

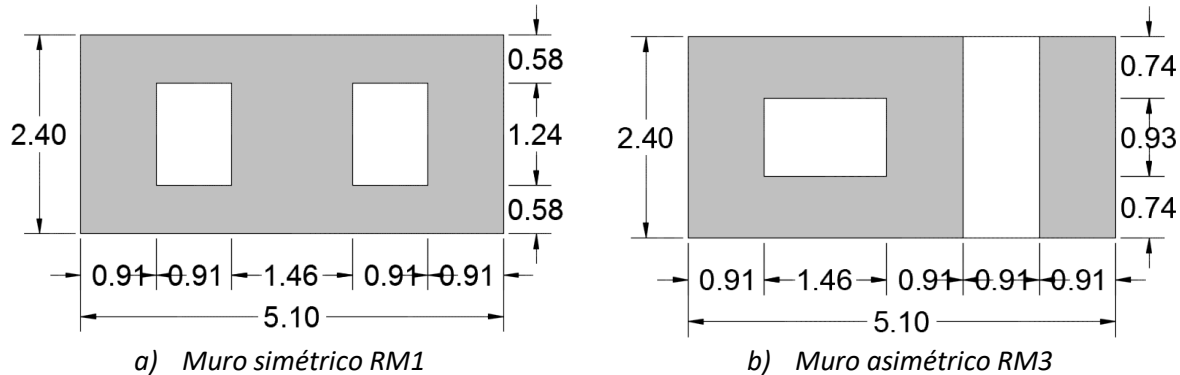
## CAPÍTULO 3. MUROS CON MÚLTIPLES ABERTURAS

Para los análisis de muros con múltiples aberturas se tomaron en cuenta modelos con dos diferentes configuraciones (*Figura 3.1*), que se basan en las configuraciones estudiadas para muros de tres niveles escala 1:4 (*Figura 1.13*) en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign tanto experimental (Abrams *et al.* 1990) como analíticamente (Tena-Colunga y Abrams 1990). Se pueden clasificar en dos casos:

**Simétricos:** Dos aberturas del mismo tamaño cuyo centroide coincide con el del muro, *Figura 3.1a*. El parámetro (porcentaje) de abertura es aproximadamente del 18%.

**Asimétricos:** Dos aberturas cuyo centroide resultó con una excentricidad del 25%, *Figura 3.1b*. El parámetro (porcentaje) de abertura es aproximadamente del 29%.

De igual manera, se consideraron muros de 3, 6, 9, 12, 15 y 18 niveles, con los tres tipos diferentes de mampostería y seis sistemas de piso mencionados en el capítulo 2, resultando en 252 modelos diferentes (*Apéndice B*).



*Figura 3.1. Dimensiones (en metros) de los muros de múltiples aberturas estudiados*

Las configuraciones en elevación fueron tomadas de Abrams *et al.* (1990) y escaladas para que se lograra una equivalencia en el área gruesa del muro con los de una sola fila de aberturas que se estudiaron en el capítulo 2. De igual manera, se utilizaron el mismo espesor de muro (22 cm), de losa (12 cm), ancho equivalente, ubicación de losa (*figura 2.1d*), y fuerza lateral aplicada (158.76 ton=350 kips). La excentricidad para este tipo de muros se mide de la misma manera, la diferencia radica en que ahora se debe calcular con la abertura equivalente. Las distintas propiedades de los muros y losas fueron introducidas de la misma manera, mediante el módulo de rigidez de los elementos y se muestran en las *tablas 2-1* y *2-2*.

### 3.1. Estimaciones con elementos finitos

Los elementos utilizados en estos modelos, fueron realizados bajo las mismas consideraciones que los muros de una sola fila de aberturas, elementos tipo cascarón grueso (shell thick), con materiales elásticos, lineales, homogéneos e isotrópicos, con  $\nu=0.15$ . La aplicación de la fuerza lateral, se realizó con la misma configuración, de tres líneas de aplicación (extremos y centro, *figura 3.2*).

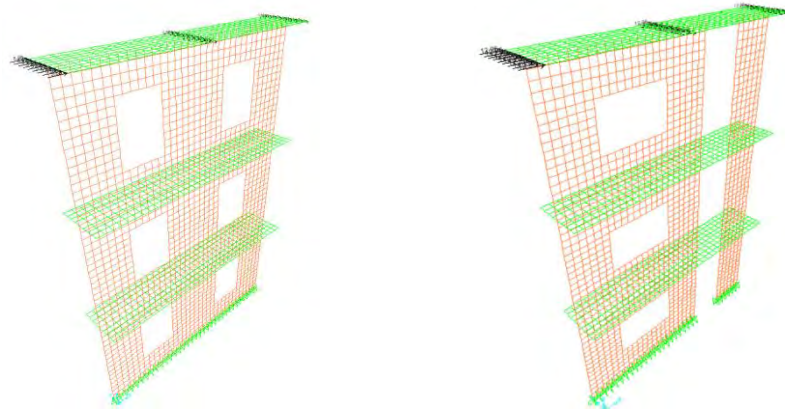


Figura 3.2. Configuraciones de aplicación de carga utilizados en RM1 y RM3

Como se observa en las figuras 3.1b y 3.2, el muro RM3 tiene una abertura del mismo alto que el propio muro, de modo que en los modelos de MEF se agregó una tira de elementos de muro para dar continuidad al muro. En estos modelos la selección del mallado se realizó desde un inicio para poder proponer uno adecuado para ambas configuraciones, por lo que únicamente se evaluaron para muros de tres niveles. En la figura 3.3 el primer punto de cada curva representa un mallado con menos elementos a los utilizados a lo largo de este trabajo, el segundo punto es el mallado utilizado (Figura 3.4) y el tercero es considerando un mallado más fino. Como se observa, la energía tiende a estabilizarse entre el mallado utilizado y el más fino, como se vio con los muros simétricos, esto se vuelve más evidente a medida que se incrementa la altura, por lo que se considera que el mallado fue adecuado.

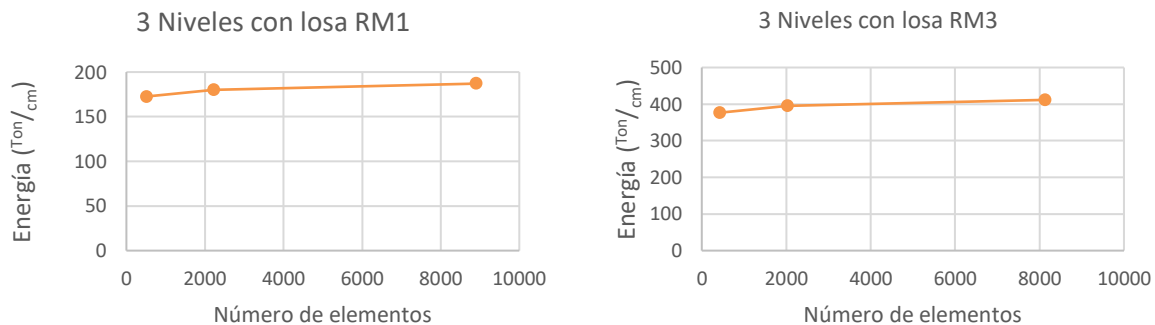
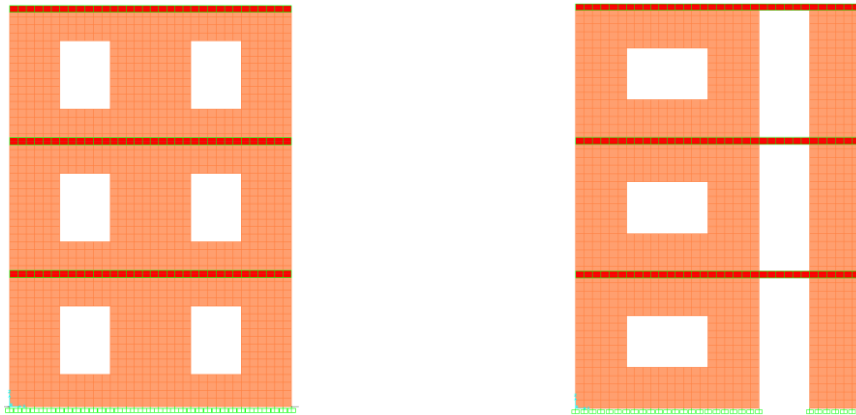


Figura 3.3. Comprobación de mallado adecuado para muros de múltiples aberturas



a) Muro simétrico de tres niveles con losa RM1

b) Muro asimétrico de tres niveles con losa RM3

Figura 3.4. Patrones de aberturas utilizados en muros de múltiples aberturas

### 3.2. Propuestas para estimar aberturas equivalentes

Para poder aplicar los métodos simplificados a este tipo de muros, es necesario que se obtenga una abertura equivalente que represente el comportamiento que tendría el muro real. Se revisó la propuesta de Rivera (2006) descrita y ejemplificada en Tena *et al.* (2011), de la siguiente manera:

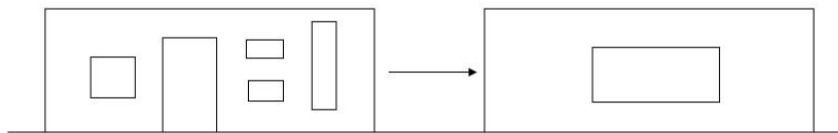


Figura 3.5. Simplificación de muros con múltiples aberturas en uno con una abertura equivalente. Tomado de Tena *et al.* (2011)

- 1) Se forma una sola abertura desplazando las aberturas individuales o partes de ellas (teniendo cuidado de no intercambiarlas o traslaparlas), hasta formar un gran rectángulo con algunos apéndices rectangulares, figura 3.6.

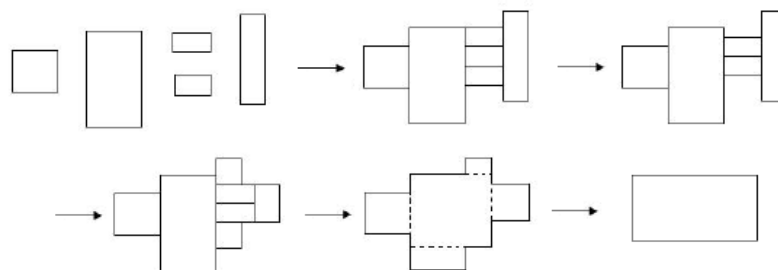


Figura 3.6. Ejemplo de la obtención de una abertura equivalente. Tomado de Tena *et al.* (2011)

- 2) El área de la abertura equivalente ( $A_e$ ) es la suma de las áreas individuales.
- 3) Se calcula el área del rectángulo mayor y sus apéndices ( $A_i$ ).

- 4) La proporción largo-alto de la abertura equivalente se obtiene calculando un promedio pesado de las alturas y largos de la nueva discretización (ecuación 3.1):

$$\frac{H'_e}{L'_e} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i A_i}{\sum_{i=1}^n L_i A_i} \quad (3.1)$$

- 5) Las dimensiones de la abertura quedan dadas por (ecuaciones 3.2):

$$L_e = \sqrt{A_e \frac{L'_e}{H'_e}} \quad y \quad H_e = \sqrt{A_e \frac{H'_e}{L'_e}} \quad (3.2)$$

- 6) El centroide de la nueva abertura se ubica en el centroide de las aberturas originales.

Adicionalmente, se formuló una nueva propuesta en conjunto con el director de esta tesis, que para el caso del muro RM3 se revisaron dos variantes en distintas alturas, ya que para el muro simétrico ambas propuestas coinciden, figura 3.7.

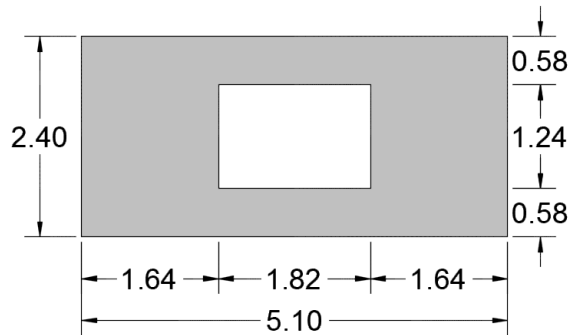


Figura 3.7. Abertura equivalente obtenida con las propuestas de Rivera (2006) y nueva propuesta

La nueva propuesta para calcular aberturas equivalentes consiste simplemente en que:

- 1) El área de la abertura equivalente es la suma de las áreas de las aberturas reales (ecuación 3.3).

$$A_e = \sum_{i=1}^n A_i \quad (3.3)$$

- 2) La altura de la abertura equivalente es el promedio de las alturas de las aberturas reales (ecuación 3.4).

$$H_e = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (3.4)$$

- 3) La longitud de la abertura equivalente se obtiene en proporción al área de ésta (ecuación 3.5).

$$L_e = \frac{A_e}{H_e} \quad (3.5)$$

Para definir la ubicación de dicha abertura equivalente, se propusieron dos variantes:

- 4) La abertura equivalente se ubicará en:
  - a. La más lógica, que consiste en ubicar a la abertura equivalente simétrica con respecto al centroide (largo y alto) de las aberturas originales (propuesta centroide, *figura 3.8b*). En caso que al ubicar a la abertura con respecto al centroide hiciera que ésta saliera de los límites que definen al entrepiso en la altura, entonces se propone ubicarla en el borde inferior, de manera que toda la abertura quede dentro del muro.
  - b. En el centroide de las aberturas reales en la dirección longitudinal del muro, pero en la altura se ubicará en la base del muro (propuesta base, *figura 3.8c*).

La revisión de las propuestas se realizó con el MEF, como se muestra en la *figura 3.9*. De los resultados mostrados en las *figuras 3.10* y *3.11*, se concluyó que la propuesta centroide tenía mejores aproximaciones, de manera que con esa abertura se realizaron los análisis con los métodos simplificados.

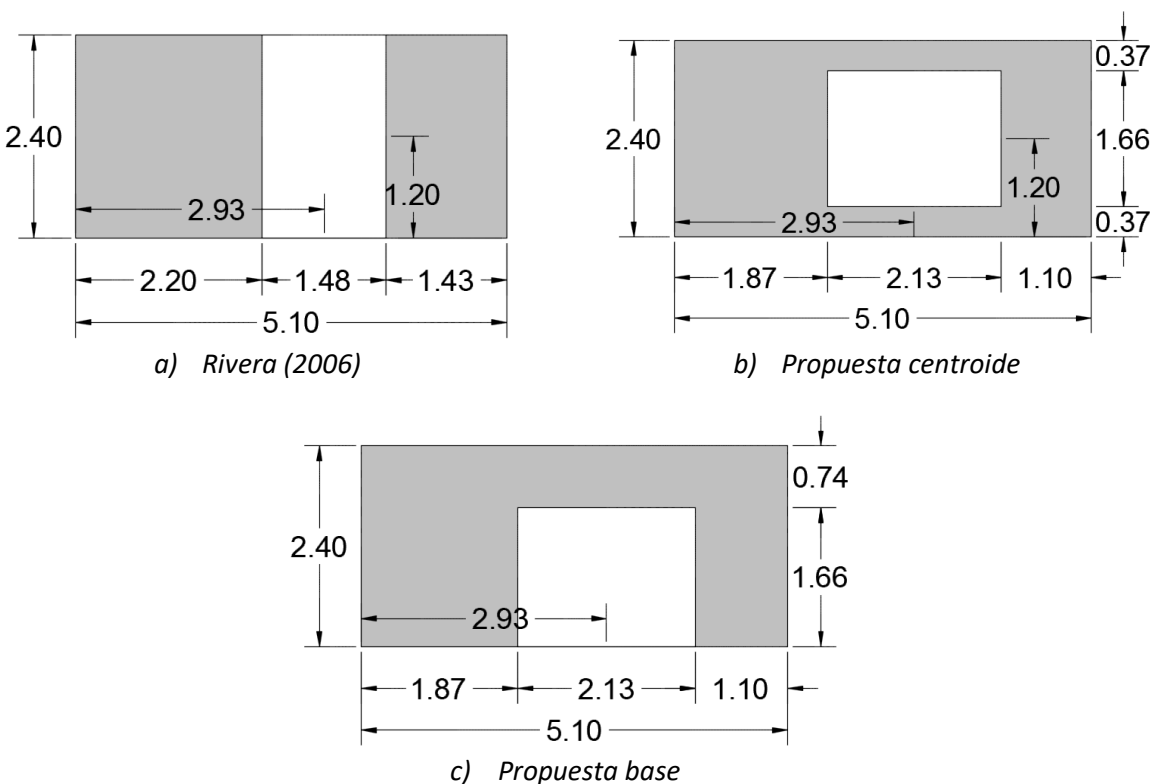


Figura 3.8. Aberturas equivalentes obtenidas con las propuestas estudiadas



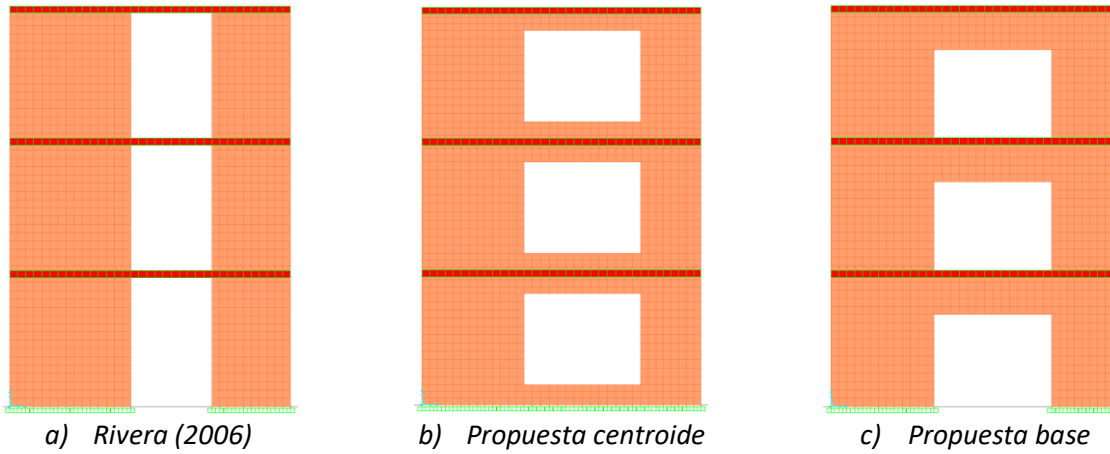


Figura 3.9. Propuestas de aberturas equivalentes

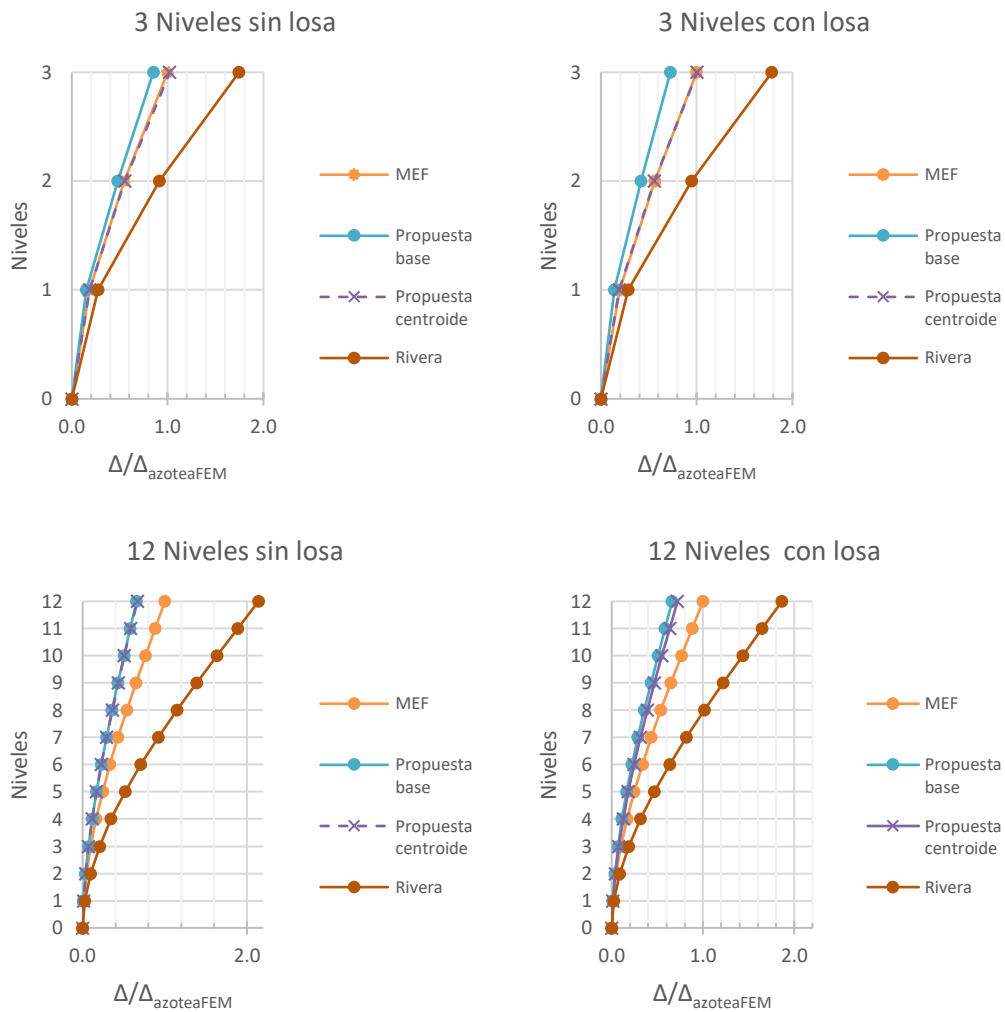


Figura 3.10. Comparación de desplazamientos obtenidos con las diferentes propuestas de aberturas equivalentes en muros de tres y 12 niveles con y sin losa

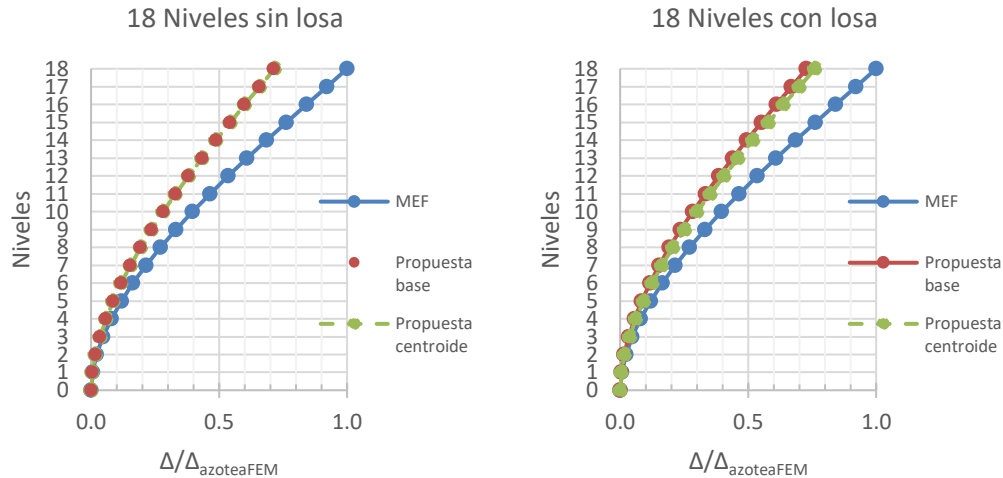


Figura 3.11. Comparación de desplazamientos máximos obtenidos con las diferentes propuestas de aberturas equivalentes en 18 niveles con y sin losa

### 3.3. Aproximaciones obtenidas con métodos simplificados empleando las propuestas de las aberturas equivalentes

Como se mencionó antes, ambos métodos simplificados (CC y MEQ) utilizan en los cálculos las secciones brutas de los muros, por lo que únicamente se utilizaron las condiciones que proporcionan las aberturas equivalentes. Las consideraciones de vigas de acoplamiento y cargas aplicadas se realizaron de la misma manera que en los muros de una sola fila de aberturas. Para ello, se utilizaron la hoja de cálculo y el programa de igual manera que en el capítulo anterior.

Durante la realización del trabajo se observó que los desplazamientos obtenidos eran muy grandes cuando no se consideraba la losa, sobre todo en el caso del tipo de mampostería más flexible, así que surgió la duda de que estuvieran funcionando bien las aberturas equivalentes, por lo que se realizó una comparación más completa con el MEF para los muros de nueve niveles sin losa y con las losas más flexible y más rígida. En la figura 3.12 se observa que para el muro con una losa con módulo elástico  $E=300 \text{ ton/cm}^2$ , que es el caso más rígido, los perfiles de desplazamiento obtenidos para el muro con la abertura equivalente se superponen con los obtenidos para el muro “real” (RM3), mientras que para el caso de una losa con módulo elástico  $E=84 \text{ ton/cm}^2$ , que es la más flexible de las consideradas, se tiene una aproximación razonable. Sin embargo, cuando no se considera la losa, se observan diferencias del 30%, por lo que en esa configuración es muy importante que se considere la presencia del sistema de piso.

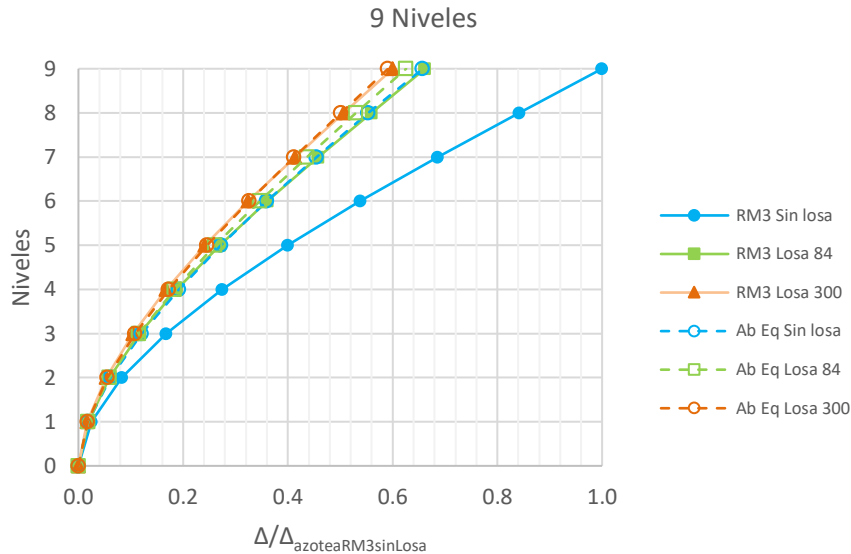


Figura 3.12. Comparación de desplazamientos obtenidos con la abertura equivalente y MEF en muros de nueve niveles con y sin losa

### 3.4. Análisis de resultados

De igual manera que en el CAPÍTULO 2, con las aproximaciones obtenidas con los tres métodos, se graficaron los perfiles de desplazamiento laterales de todos los muros (APÉNDICE F), normalizando respecto a las obtenidas con el MEF.

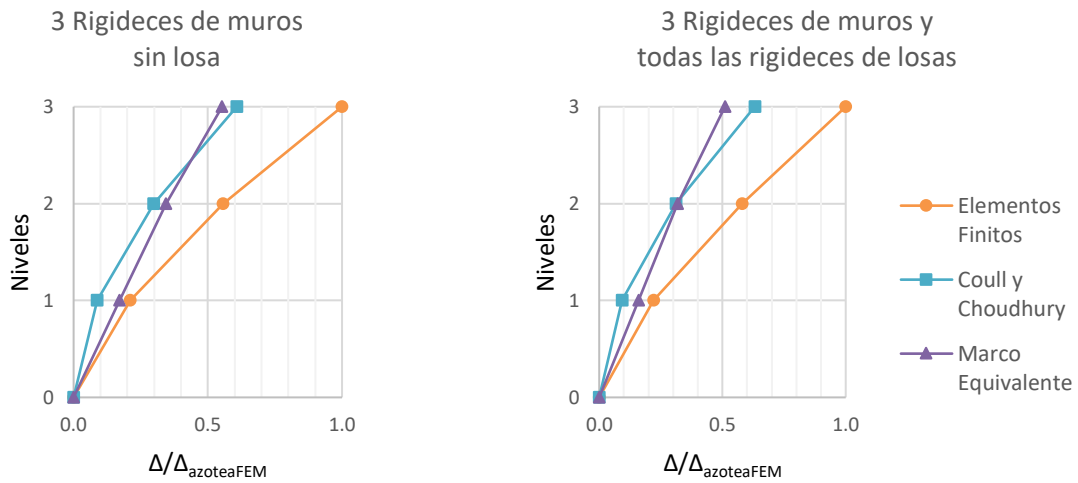
#### 3.4.1. Muros simétricos

En los muros de tres niveles (Figura 3.13), se observa que, para ambos métodos simplificados (MEQ y CC), las aproximaciones obtenidas no son buenas.

En el caso del método de CC, para los modelos de tres niveles (Figura 3.13) son prácticamente constantes, se tienen 61% cuando no se considera el sistema de piso y del 63% para todos los demás casos. Para los muros de seis niveles (Figura 3.14), mejoran las aproximaciones, resultando entre el 75% y 76%. Para nueve niveles (Figura 3.15) aumenta la aproximación a un 79% para todos los muros, 80% para 12 niveles (Figura 3.16), 81% para 15 niveles (Figura 3.17), llegando hasta un 81% y 82% para 18 niveles (Figura 3.18).

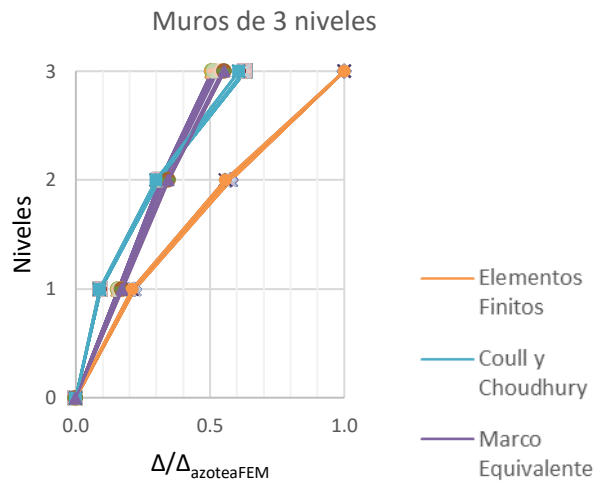
En el método del MEQ, para todas las alturas estudiadas, las aproximaciones van empeorando conforme se considera y rigidiza el sistema de piso en los dos tipos de mampostería más rígida. En la flexible se aprecia un decremento al pasar de sin losa a la losa más flexible, pero una muy ligera mejora conforme se va rigidizando la losa. En el caso de muros de tres niveles (Figura 3.13), la aproximación es de sólo el 55% cuando no se considera sistema de piso y 51% para los casos con la losa más rígida. Para los muros de seis niveles (Figura 3.14), las aproximaciones se mantienen en un máximo de 55% con respecto al MEF. Para nueve, doce y quince niveles

(Figura 3.15 a Figura 3.17) siguen entre un 56% y 57%. Para 18 niveles, las aproximaciones con el método del MEQ se estancan en 56% para todos los casos (Figura 3.18).



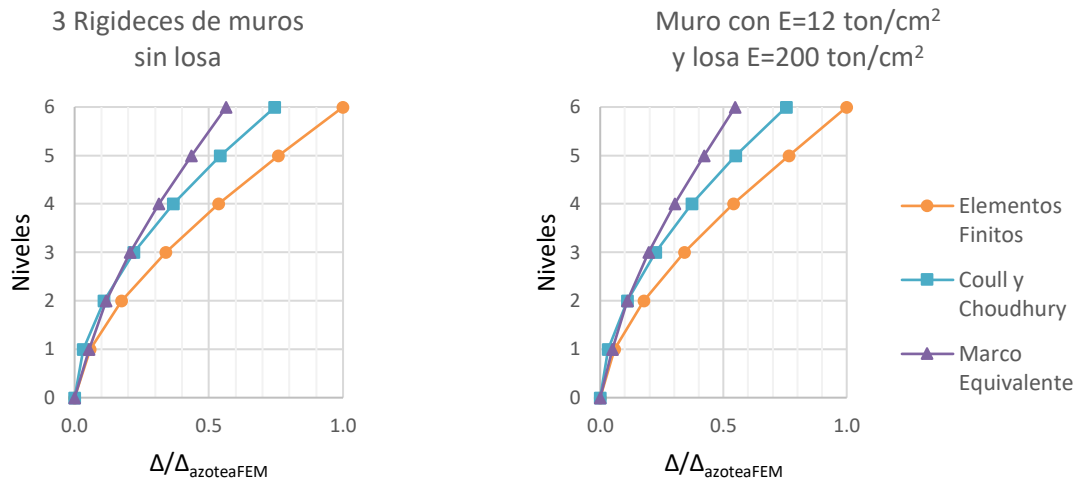
a) Casos con menores aproximaciones

b) Casos con mayores aproximaciones



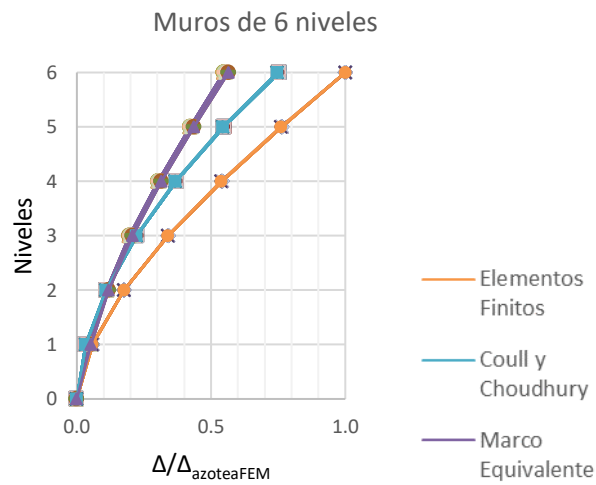
c) 21 casos de tres niveles

Figura 3.13. Comparación de aproximaciones de muros de tres niveles con múltiples aberturas RM1



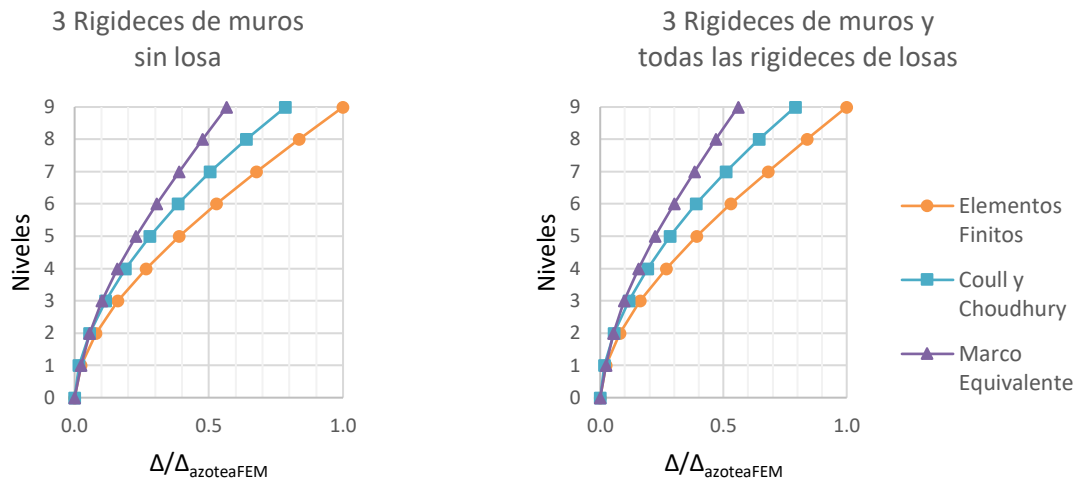
a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



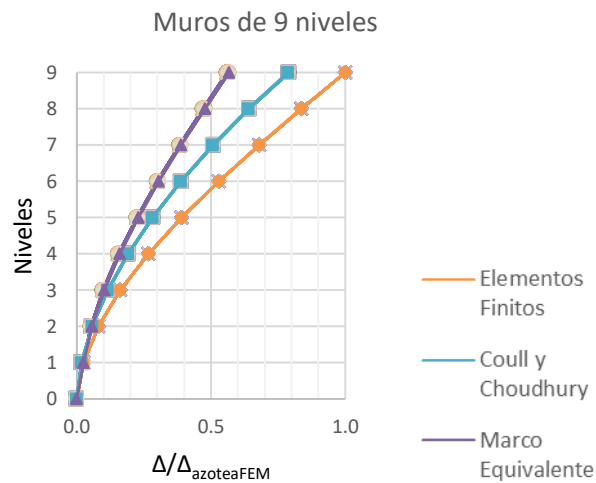
c) 21 casos de seis niveles

Figura 3.14. Comparación de aproximaciones de muros de seis niveles con múltiples aberturas RM1



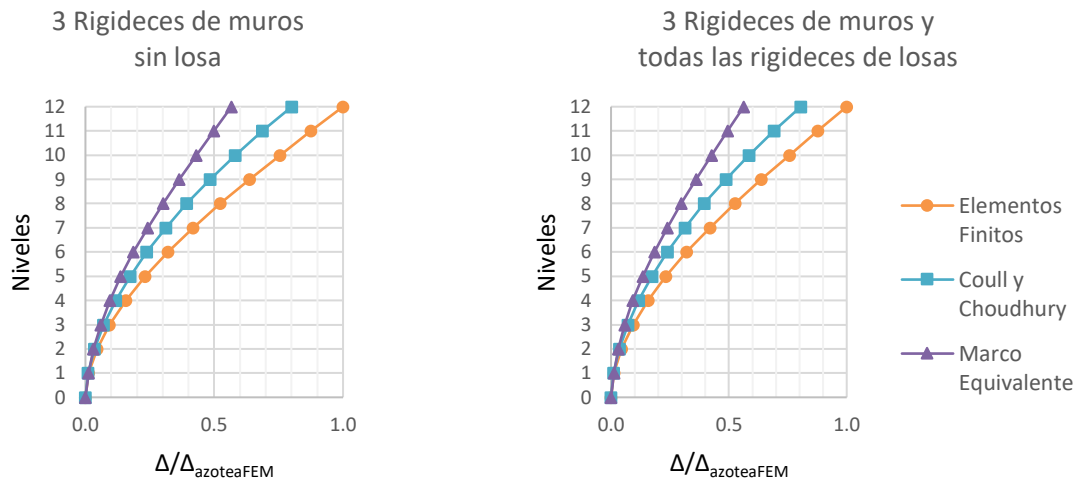
a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



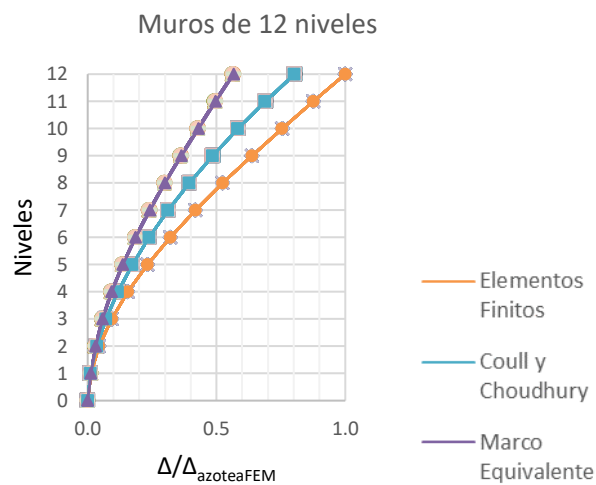
c) 21 casos de nueve niveles

Figura 3.15. Comparación de aproximaciones de muros de nueve niveles con múltiples aberturas RM1



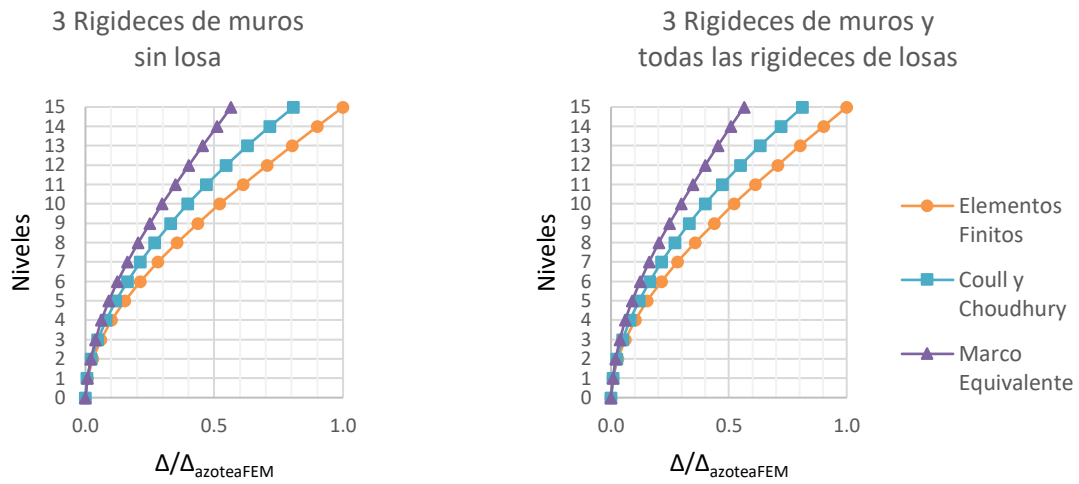
a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



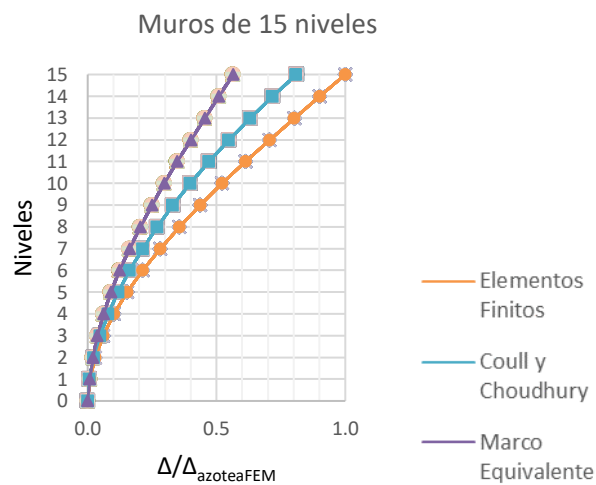
c) 21 casos de 12 niveles

Figura 3.16. Comparación de aproximaciones de muros de 12 niveles con múltiples aberturas RM1



a) Casos con menores aproximaciones

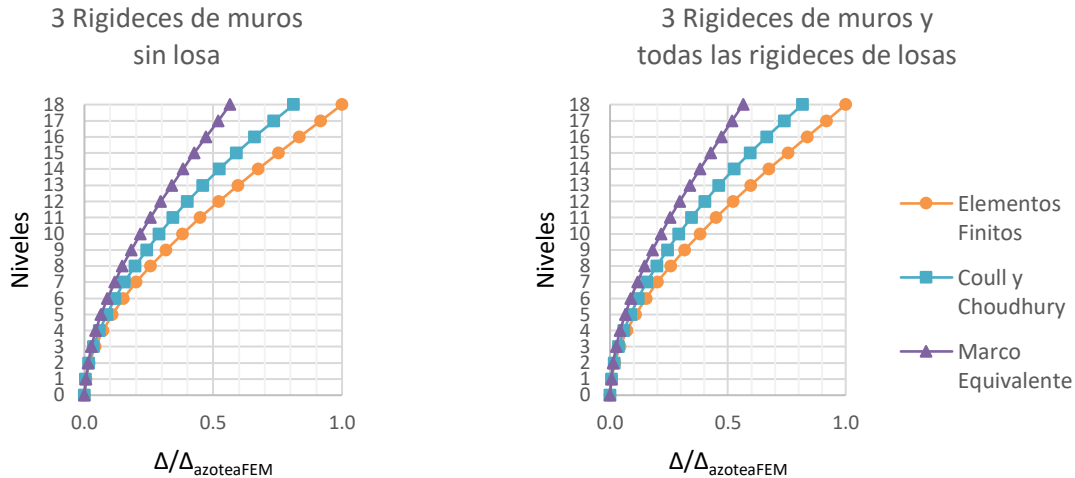
b) Caso con mayores aproximaciones



c) 21 casos de 15 niveles

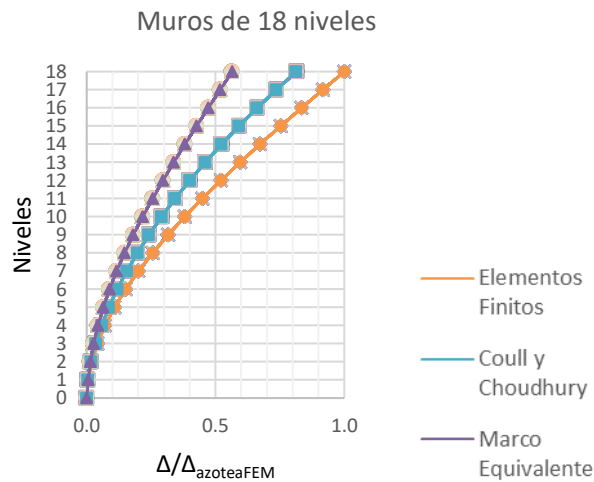
Figura 3.17. Comparación de aproximaciones de muros de 15 niveles con múltiples aberturas RM1





a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



c) 21 casos de 18 niveles

Figura 3.18. Comparación de aproximaciones de muros de 18 niveles con múltiples aberturas RM1

### Observaciones generales

A partir del análisis de todos los resultados obtenidos y discutidos brevemente anteriormente, se pueden formular las siguientes observaciones generales:

- A diferencia de la mayoría de los casos estudiados anteriormente (CAPÍTULO 2), para estos muros no mejoran las aproximaciones a medida que se flexibiliza el muro. Sin embargo, sí mejora cuando se rigidiza el sistema de piso, aunque este efecto tiene mucho menor influencia.
- Se observa que con el método del MEQ se obtienen ligeramente mejores resultados para los muros más rígidos, pero a medida que se incrementa la altura, tiende a estancarse en un 56%.

- Por otra parte, con el método de CC las aproximaciones mejoran conforme se aumenta la altura de los modelos. El considerar y rigidizar el sistema de piso no modifica visiblemente las aproximaciones obtenidas.
- El hecho de considerar la rigidez de la losa en los muros simétricos no hace gran diferencia para ninguno de los tres métodos en estudio, incluso cuando se considera el tipo de mampostería más flexible, de manera que, en esta configuración, la restricción del sistema de piso pudiera no considerarse.
- El método del marco equivalente (MEQ) es un poco más sensible a la presencia del sistema de piso, pero sin influir de manera importante.
- Cabe mencionar que la precisión de los dos métodos simplificados (MEQ y CC) no cambia cuando se flexibiliza el muro, si no se considera el sistema de piso.

#### 3.4.2. Muros asimétricos

En los muros de tres niveles (*Figura 3.19*), las aproximaciones calculadas con ambos métodos simplificados (CC y MEQ) no son buenas. En el caso del método de CC van del 57% cuando no se considera el sistema de piso al 76% para la combinación muro menos rígido con losa más flexible, como se había manifestado en los casos de una sola abertura. Con el método del MEQ, las aproximaciones van empeorando conforme se considera y rigidiza el sistema de piso en la mampostería más rígida, pues varían a la baja de 56% al 49%. En los muros de menor rigidez, se aprecia un decremento al pasar de sin losa a losa más flexible, pero una muy ligera mejora conforme se va rigidizando la losa, logrando un 58% para la combinación muro más flexible con la losa más rígida.

Como se comentó en la *sección 3.3*, se observó que, cuando no se considera el sistema de piso en el MEF, para todas las alturas, los desplazamientos resultan muy grandes, por lo que la diferencia entre tomar en cuenta o no al sistema de piso es muy notable, sobre todo para los casos de la mampostería más flexible, y tal efecto se amplifica con la altura. En este tipo de muros sólo se aprecian las tendencias cuando se analizan por tipo de muro y considerando la losa, y se observa que, a medida que se rigidiza el muro, dichas tendencias dejan de ser tan marcadas como en todos los casos anteriores, sobre todo para el método de CC.

En los muros de seis niveles (*Figura 3.20*), mejoran ligeramente las aproximaciones cuando no se considera la losa, dando el 51% con el método de CC y el 52% con el método del MEQ, mientras que cuando se consideran las losas se obtiene entre el 55% y 82% con CC y entre el 55% y 78% con el método del MEQ. Con estos resultados se muestra que la precisión varía sustancialmente dependiendo de la rigidez de la losa, aunque se aprecia que la precisión mejora a medida que se flexibiliza el muro.

De nueve niveles en adelante (*Figura 3.21 a Figura 3.24*), se obtienen mejores aproximaciones con el método del MEQ que con el método de CC. Para los muros de nueve niveles (*Figura 3.21*), se obtiene el 58% con el método del MEQ y el 53% con el método de CC para muros sin losa. Para muros con losa, aumentan entre el 62% y 88% con el método del MEQ y entre el

58% y 84% con el método de CC. Se sigue observando que la precisión mejora a medida que se flexibiliza el muro.

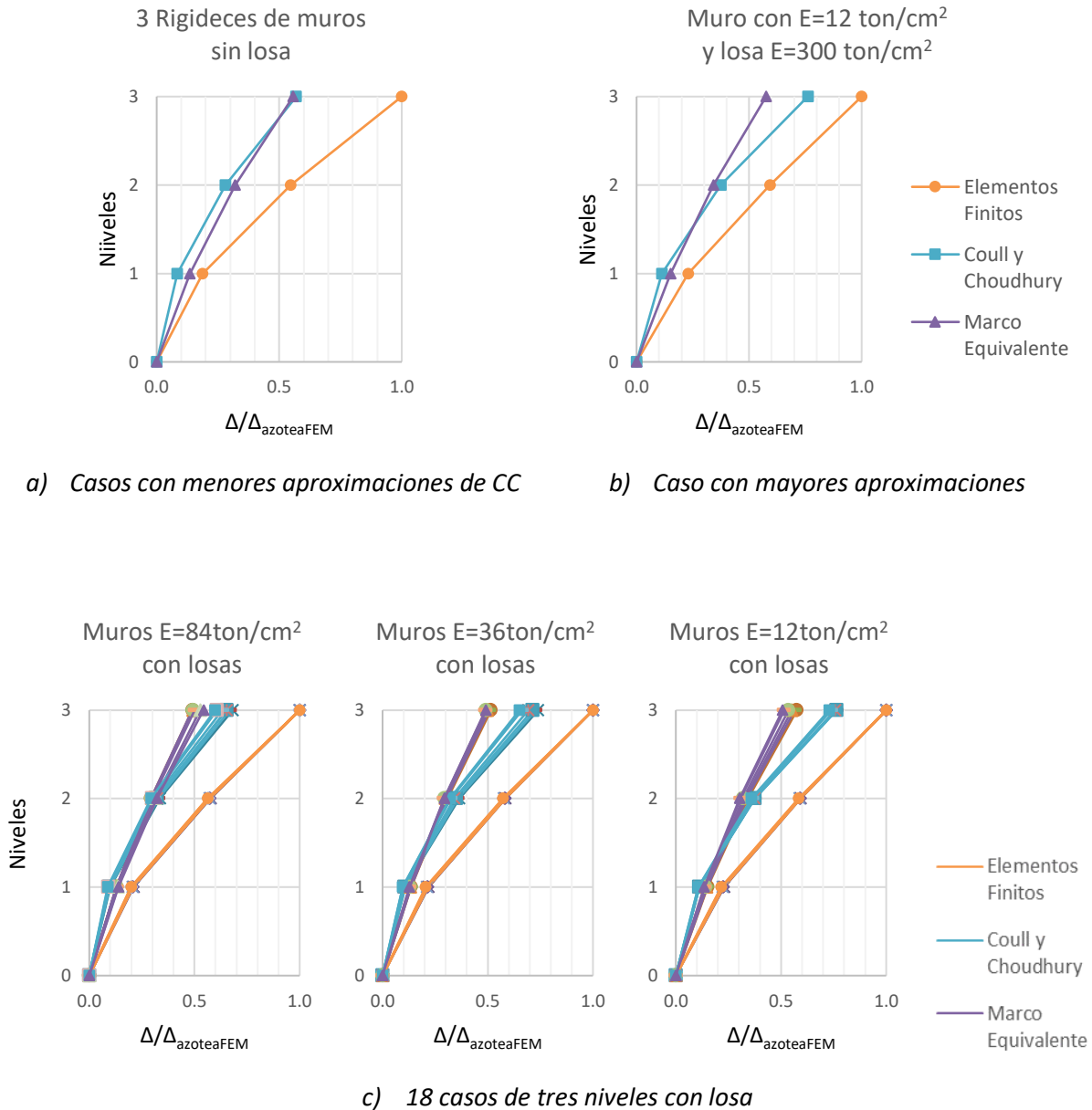


Figura 3.19. Comparación de aproximaciones de muros de tres niveles con múltiples aberturas RM3

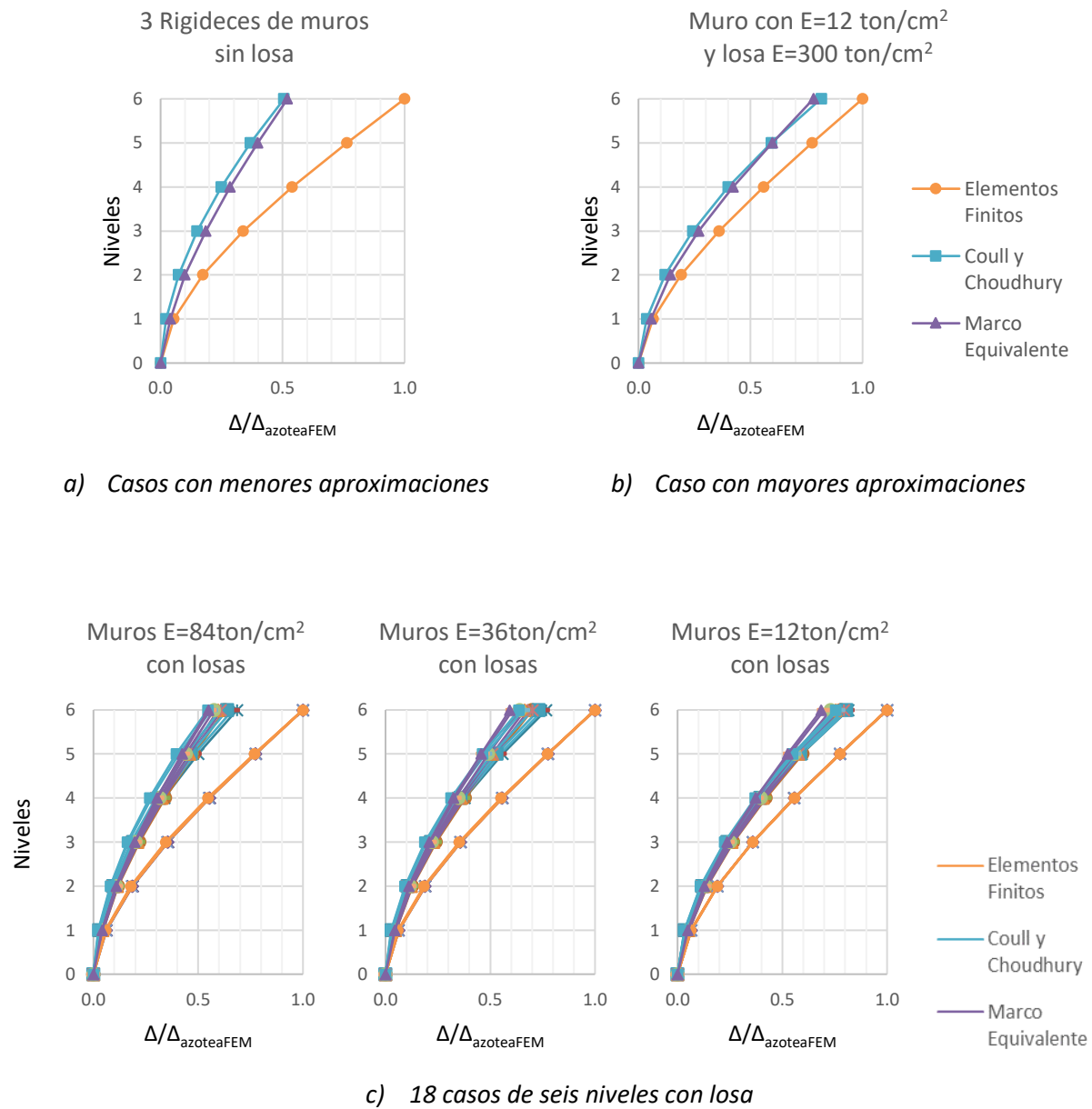


Figura 3.20. Comparación de aproximaciones de muros de seis niveles con múltiples aberturas RM3

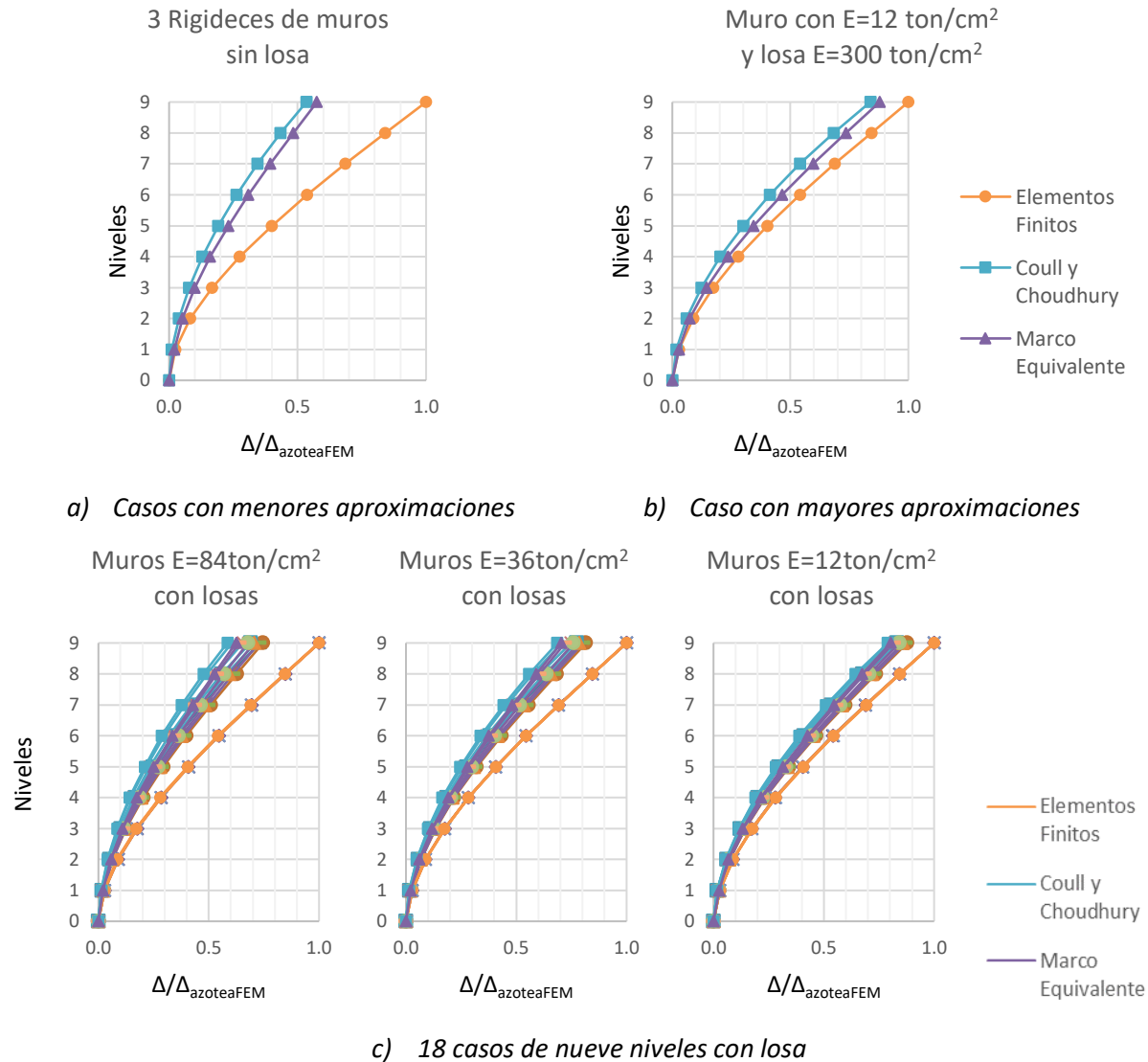


Figura 3.21. Comparación de aproximaciones de muros de nueve niveles con múltiples aberturas RM3

En el caso de muros de 12 niveles sin losa (Figura 3.22), con el método del MEQ se obtiene una aproximación del 64% y con el método de CC del 58%. Cuando se considera el sistema de piso, el intervalo de aproximación sube, estando entre el 70% y 93% con el método del MEQ y entre el 64% y 85% con el método de CC. Sigue mejorando la precisión a medida que se flexibiliza el muro.

En los muros de 15 niveles (Figura 3.23), sin losa se obtienen aproximaciones de 71% con el método del MEQ y de 63% con el método de CC; mientras que con losa, con el método del MEQ se obtiene una aproximación entre el 76% y 95% y con el método de CC entre el 68 y 86%. Cuando se tienen 18 niveles (Figura 3.24), sin losa se obtienen aproximaciones de 76% con el método del MEQ del 67% con el método de CC. Para los muros con losa, las aproximaciones aumentan, siendo entre un 81% y 96% con el método del MEQ y entre un 72% y 86% con el método de CC. Sigue mejorando la precisión a medida que se flexibiliza el muro.

Cuando el muro es más flexible, las aproximaciones de los perfiles de desplazamientos obtenidos con el método del MEQ son muy cercanos a los calculados con el MEF.

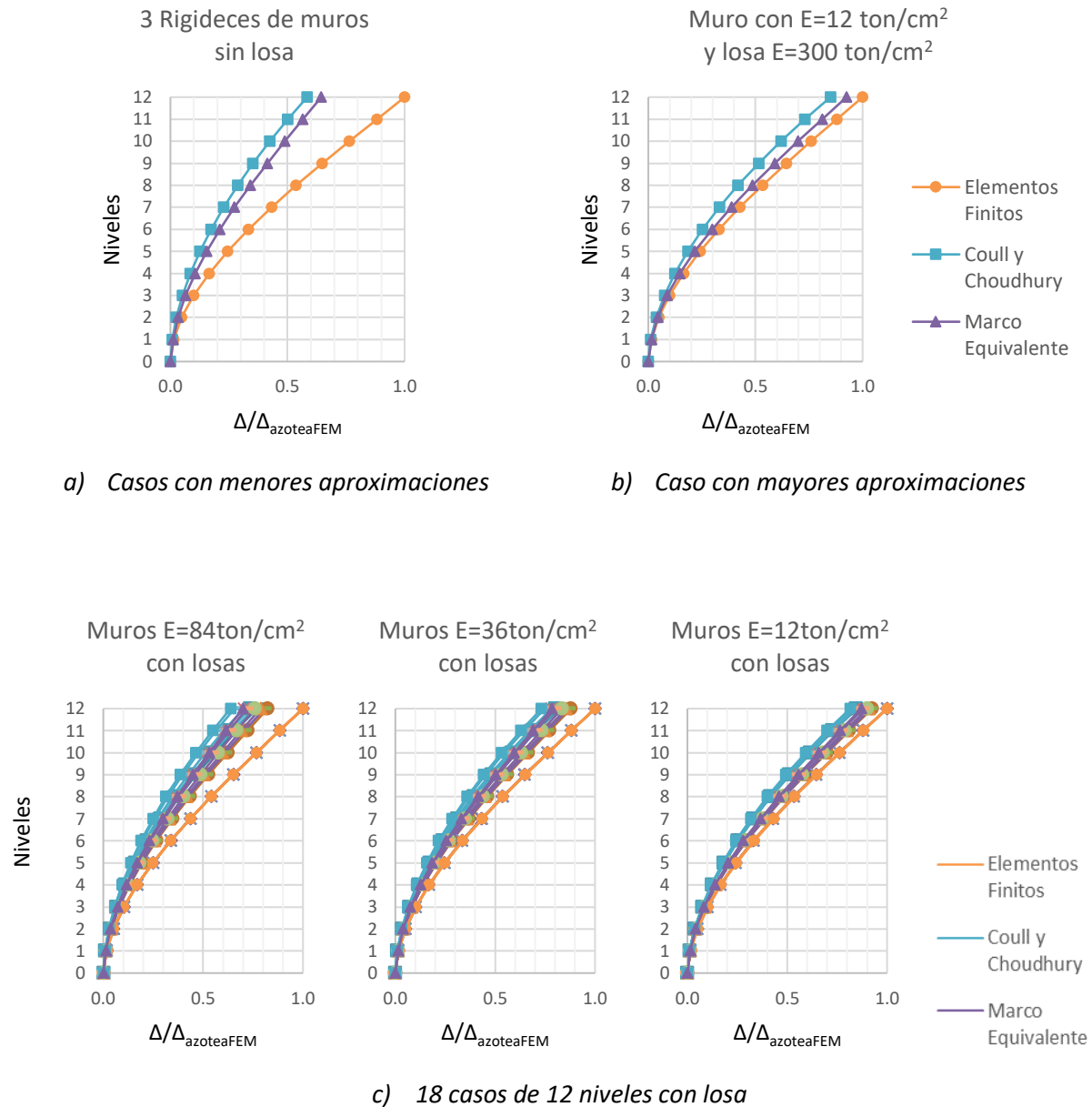
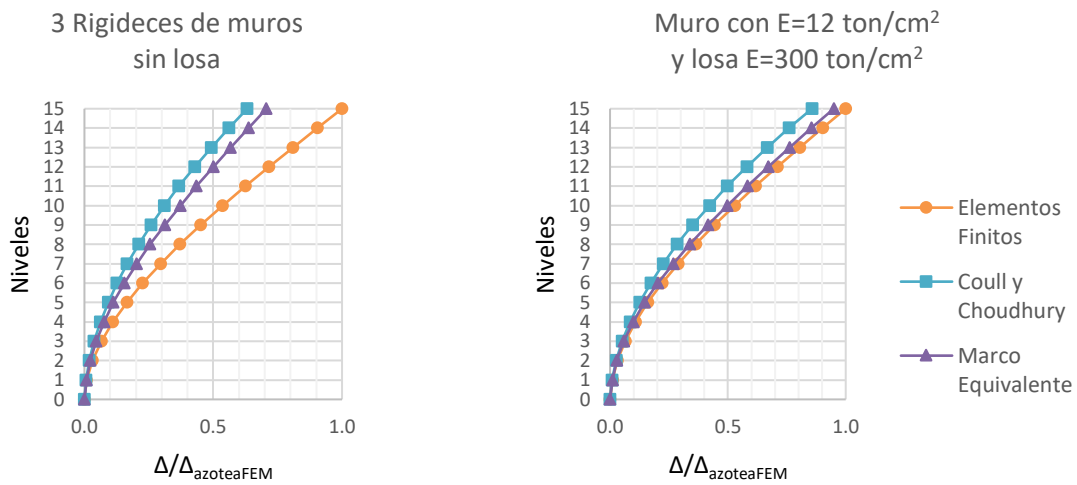
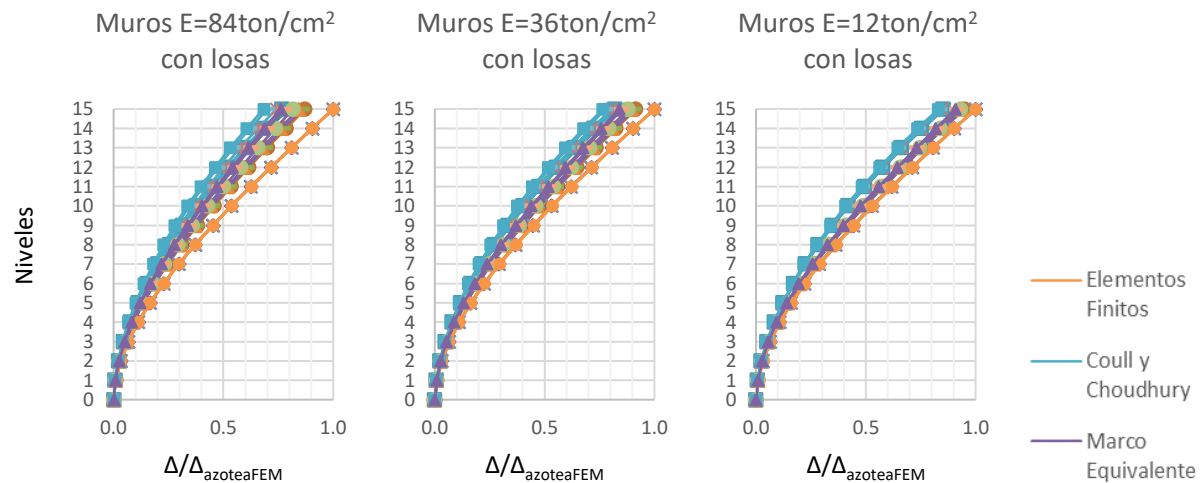


Figura 3.22. Comparación de aproximaciones de muros de 12 niveles con múltiples aberturas RM3



a) Casos con menores aproximaciones

b) Caso con mayores aproximaciones



c) 18 casos de 15 niveles con losa

Figura 3.23. Comparación de aproximaciones de muros de 15 niveles con múltiples aberturas RM3

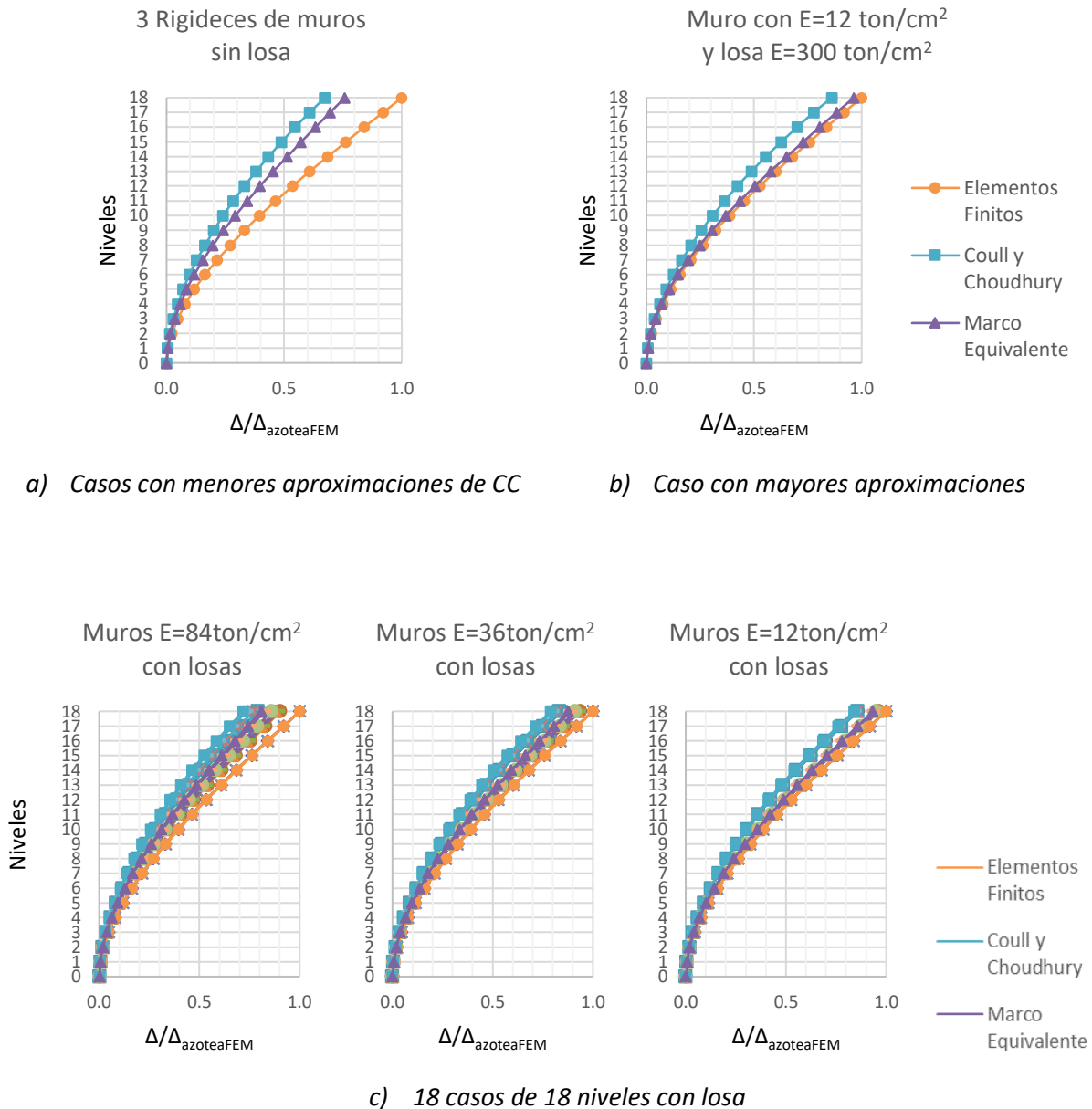


Figura 3.24. Comparación de aproximaciones de muros de 18 niveles con múltiples aberturas RM3

#### Observaciones generales

A partir del análisis de todos los resultados obtenidos y discutidos brevemente anteriormente, se pueden formular las siguientes observaciones generales:

- El hecho de considerar la presencia y rigidez de la losa en este tipo de muros, hace una gran diferencia con el MEF para todas las alturas y los tres tipos de mampostería, cosa que no se refleja en los métodos simplificados, por lo que es necesario tomar en cuenta



el sistema de piso en el MEF y tratar de ajustar las aproximaciones obtenidas con los métodos simplificados.

- Se observa que los perfiles de desplazamiento obtenidos para los muros sin losa sólo tendrían aproximaciones razonables para el caso del muro más rígido para los modelos de 3 a 12 niveles.
- En esta configuración de aberturas, el método de CC es más sensible a la presencia del sistema de piso, a diferencia de todos los patrones de aberturas anteriores.
- La precisión de los métodos simplificados se ve afectada por el hecho de considerar aberturas asimétricas. Para la configuración estudiada, se observa que, a excepción del caso de tres niveles, nuevamente tiende a mejorar la precisión a medida que se flexibiliza el muro y se rigidiza el sistema de piso. No hay una tendencia clara en ambos métodos (CC y MEQ), la precisión varía sustancialmente de modelo a modelo.
- Cabe mencionar que la precisión de los dos métodos (CC y MEQ) no cambia cuando se flexibiliza el muro, si no se considera al sistema de piso.
- A partir de 15 niveles, las aproximaciones obtenidas con el método del MEQ son similares a las del MEF.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar las aproximaciones en la determinación de los desplazamientos laterales de muros con aberturas obtenidas con métodos simples [los métodos del marco equivalente (MEQ) y de Coull y Choudhury (CC)] cuando se comparan con el método de los elementos finitos (MEF).

Con base en los extensos análisis paramétricos realizados, se hacen las siguientes observaciones y conclusiones:

- Los mallados utilizados en el MEF fueron suficientemente finos para obtener desplazamientos representativos.
- En los muros con una sola fila de aberturas, a medida que los muros se vuelven más flexibles, la precisión de los métodos aproximados (MEQ y CC) mejora, dando las mejores correlaciones para la combinación del muro más flexible con la losa más rígida para cada caso de análisis. Las excepciones son para el método del MEQ, para muros de tres y seis niveles y para la mayor excentricidad.
- A partir de nueve niveles, con el método del MEQ se empiezan a sobreestimar los desplazamientos si no hay excentricidad, y resulta muy preciso a partir de esa misma altura cuando la excentricidad es del 40%, mientras que al tener una excentricidad del 82%, con el método del MEQ se obtienen desplazamientos del orden de la mitad de los obtenidos con el MEF.
- Por otra parte, para las dos excentricidades estudiadas, con el método de CC se obtiene una buena precisión a partir de nueve niveles para el 40%, y de seis niveles para el 82%.
- El hecho de considerar la rigidez de la losa en los muros simétricos no hace gran diferencia, incluso con el MEF cuando se consideran los dos tipos de mampostería más rígidas, de manera que, en dichos casos, la restricción impuesta por el sistema de piso es despreciable.
- Por otra parte, si no se tiene excentricidad, la rigidez de las losas es importante de tomar en cuenta con el MEF para todas las alturas cuando se considera la mampostería más flexible. Si se tiene excentricidad, la rigidez de las losas tiene menor impacto con el MEF cuando se considera la mampostería más flexible, y empieza a ser relevante a partir de los 12 niveles para la excentricidad de 40% y de 15 niveles para la excentricidad de 82%. Ninguno de estos efectos se refleja en los métodos simplificados. Por lo tanto, es necesario tomar en cuenta el sistema de piso en el MEF y tratar de mejorar las aproximaciones obtenidas con los métodos simplificados mediante factores que tomen en cuenta tanto la excentricidad como la rigidez del sistema de piso.
- El método del marco equivalente (MEQ) es un poco más sensible a la presencia del sistema de piso cuando no se tiene excentricidad y para la excentricidad del 40%, pero sin influir de manera importante.
- Se observa que la excentricidad empieza a influir en la precisión de los métodos simplificados. En comparación con los muros simétricos, las aproximaciones obtenidas

con el método del MEQ empeoran, mientras que las obtenidas con el método de CC mejoran.

- Se nota una mejor precisión en los muros con excentricidad respecto a la obtenida de los muros simétricos, sobre todo para los muros con mayor número de niveles (esbeltos), esto se debe a que las deformaciones por cortante dejan de ser importantes a medida que la relación de esbeltez aumenta. Recordando que cuanto más esbelto sea un elemento, este tiende a comportarse como un elemento en voladizo, y conforme se incrementa la excentricidad, uno de los muros individuales (columnas) de los muros estudiados es cada vez más esbelto, por lo que el efecto de esbeltez influye de manera global como por muro individual (columna), y es más notorio en el método de CC.
- En muros con múltiples aberturas, también mejora la precisión del método cuando se flexibiliza el muro en el caso de muros excéntricos; mientras que cuando son simétricos, no mejoran las aproximaciones a medida que se flexibilizan los muros. Sin embargo, sí mejora cuando se rigidiza el sistema de piso, aunque este efecto tiene menor influencia.
- Se observa que con el método del MEQ, en los muros simétricos se obtienen estimaciones del orden de la mitad de las calculadas con el MEF. El considerar y rigidizar al sistema de piso empeora ligeramente las aproximaciones.
- Por otra parte, en el método de CC las aproximaciones mejoran conforme se aumenta la altura de los modelos. El considerar y rigidizar el sistema de piso no modifica las aproximaciones en el caso de muros simétricos.
- El hecho de considerar la rigidez de la losa en los muros simétricos, en este caso no hace gran diferencia para ninguno de los tres métodos en estudio (MEQ, CC y MEF), incluso cuando se considera el tipo de mampostería más flexible, de manera que, en esta configuración, la restricción del sistema de piso pudiera no considerarse. Esto se debe principalmente a que la porción de muro entre ventanas es muy peraltada y, por ello, el impacto de considerar un ancho equivalente de losa es menos significativo.
- Por otra parte, el considerar la presencia y rigidez de la losa en muros asimétricos, hace una gran diferencia con el MEF para todas las alturas y los tres tipos de mampostería, lo que no se refleja de la misma manera en los métodos simplificados. Por lo tanto, es necesario tomar en cuenta al sistema de piso en el MEF y proponer factores de ajuste para mejorar las aproximaciones obtenidas con los métodos simplificados. Cabe señalar que el método del marco equivalente es un poco más sensible a la presencia del sistema de piso cuando no hay excentricidad, pero sin influir de manera importante. Cuando se tiene excentricidad, el método de CC es más sensible a la presencia del sistema de piso, aunque sigue sin ser de gran influencia.
- Para los muros simétricos, con ninguno de los dos métodos simplificados estudiados (MEQ y CC) se obtienen estimaciones cercanas a las calculadas con el MEF. Sin embargo, para los muros asimétricos, con el método del MEQ se obtienen aproximaciones similares a las del MEF a partir de nueve niveles, para los casos de muros menos rígidos y losas más rígidas.

- El considerar la rigidez que aporta el sistema de piso empieza a tener influencia a medida que los muros se vuelven más flexibles, ya sea con la rigidez del propio muro, de la altura, de la ubicación de las aberturas o el tamaño de las aberturas. La precisión de los dos métodos no cambia cuando se flexibiliza el muro, si no se considera el sistema de piso.
- La presencia del sistema de piso impacta más en la rigidez lateral de los muros con aberturas a medida que la distancia entre aberturas de pisos consecutivos sea menor, como es el caso de los muros tipo RM3.
- Se considera que la abertura equivalente propuesta en este trabajo funciona razonablemente bien según las comparaciones hechas con elementos finitos, pero se recomienda que se sigan estudiando opciones para definir tales aberturas. Se recomienda también que se sigan haciendo estudios paramétricos en este tipo de muros, que permitan establecer una generalización de los métodos simplificados, de tal modo que sean aplicables y razonablemente confiables para cualquier muro con múltiples aberturas.

## REFERENCIAS

---

- Abrams, D. P., T. J. Paulson y A. Tena-Colunga (1990), "Aspects of response for masonry building structures", *Memorias, 4th National US Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, California, Vol. II, pp. II-57 a II-65, mayo.
- Astroza, M. y Ogaz, O. (2005), "Ensayo de muros de albañilería confinada con ladrillo cerámico con aberturas", *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Chile.
- Chaallal, O., Gauthier, D., y Malenfant, P. (1996), "Classification methodology for coupled shear walls" *Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, No. 12, pp. 1453-1458.
- Chan, H.C. y Cheung, Y.K. (1979), "Analysis of shear Wall using higher order finite elements" *Building and Environment*, Vol. 14, pp. 2017-2224.
- Coull, A. y J. R. Choudhury (1967a), "Stresses and deflections in coupled shear walls", *ACI Journal*, Vol. 64, No. 2, pp. 65-72.
- Coull, A. y J. R. Choudhury (1967b), "Analysis of coupled shear walls", *ACI Journal*, Vol. 64, No. 9, pp. 587-593.
- CSI-2005 (2005), "CSI analysis reference manual for SAP2000, ETABS, and SAFE", *Computers and Structures*, Inc., Berkeley, California, USA, October.
- Flores, L., Ríos M. y Reyes-Salinas C. (2004), "Rehabilitación con malla y mortero de muros de mampostería con aberturas", *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero.
- Harrison, T., Siddall, J.M., y Yeadon, R.E. (1975), "A modified beam stiffness matrix for interconnected shear walls", *Building Science*, Vol 10, pp. 89-94.
- Kim, H.S. y Lee D.G. (2003), "Analysis of shear wall with openings using super elements", *Engineering Structures*, Vol. 25, pp. 981-991.
- NTCC-04 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, octubre.
- NTCM-04 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, octubre.
- Rivera, G. (2006), "Determinación de la rigidez lateral en muros con aberturas", *Proyecto Terminal I*, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, diciembre.
- Schwaighofer, J. y H. F. Microys (1969), "Analysis of shear walls using standard computer programs", *ACI Journal*, Vol. 66, No. 12, pp. 1005-1007.
- Tena, A. (2007), **Análisis de estructuras con métodos matriciales**, primera edición, Limusa, septiembre, ISBN-13: 978-968-18-6980-9.
- Tena-Colunga, A. y D. P. Abrams (1990), "Estimating response of masonry structures with linear finite elements", *Memorias, Fifth North American Masonry Conference*, The University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, Vol. I, pp. 203-214, junio.

Tena, A., Rivera, G., y Vergara, J. (2011), “Estimación de la rigidez lateral elástica de muros con aberturas”, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 11, No. 2, pp. 135-162.

## APÉNDICE A. Modelos de muros con una fila de aberturas

### A.1. Muros simétricos

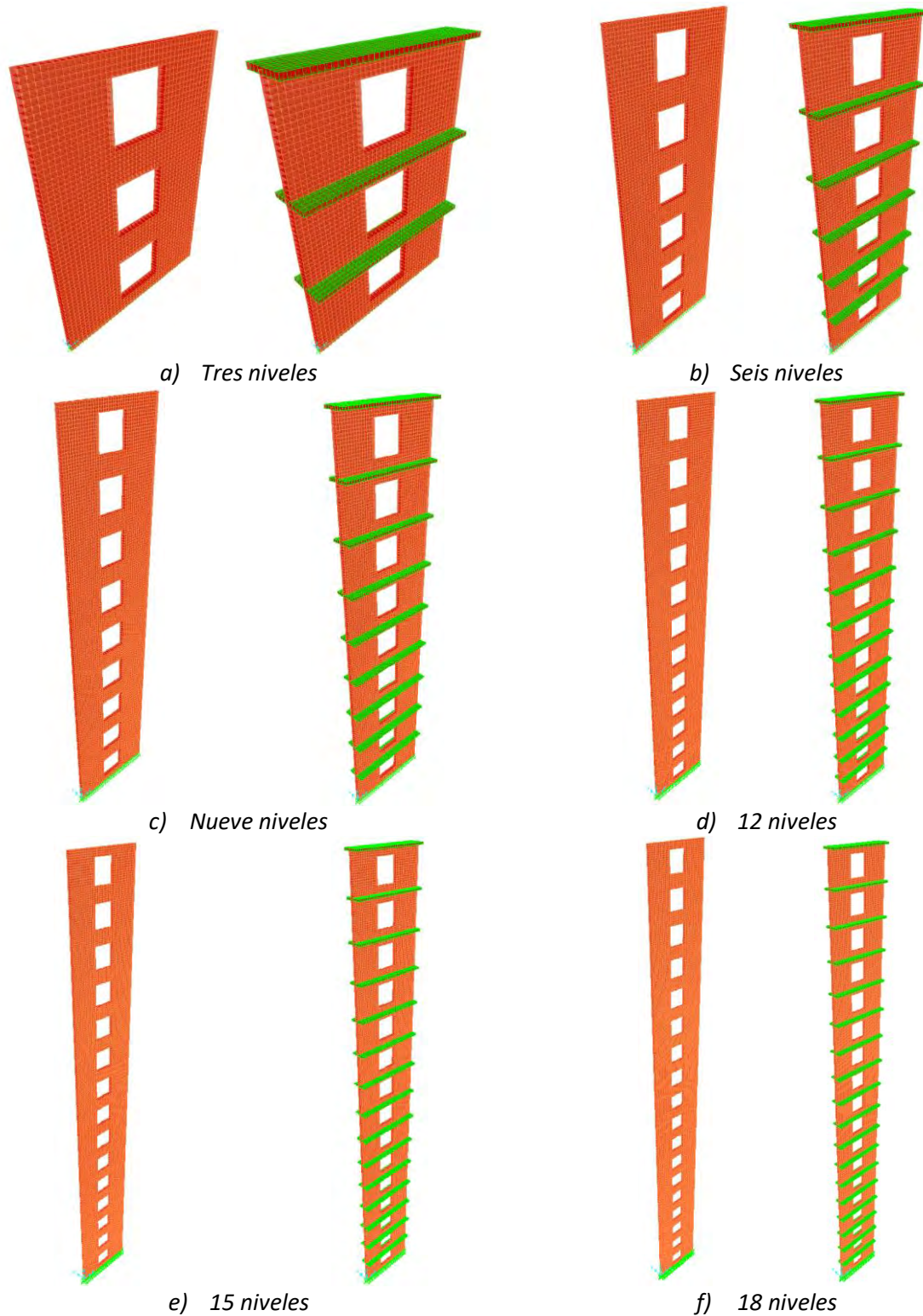


Figura A.1. Vistas de modelos en 3D con y sin losa de todas las alturas de los muros simétricos



## A.2. Muros asimétricos

### A.2.1. Muros con abertura excéntrica del 40%

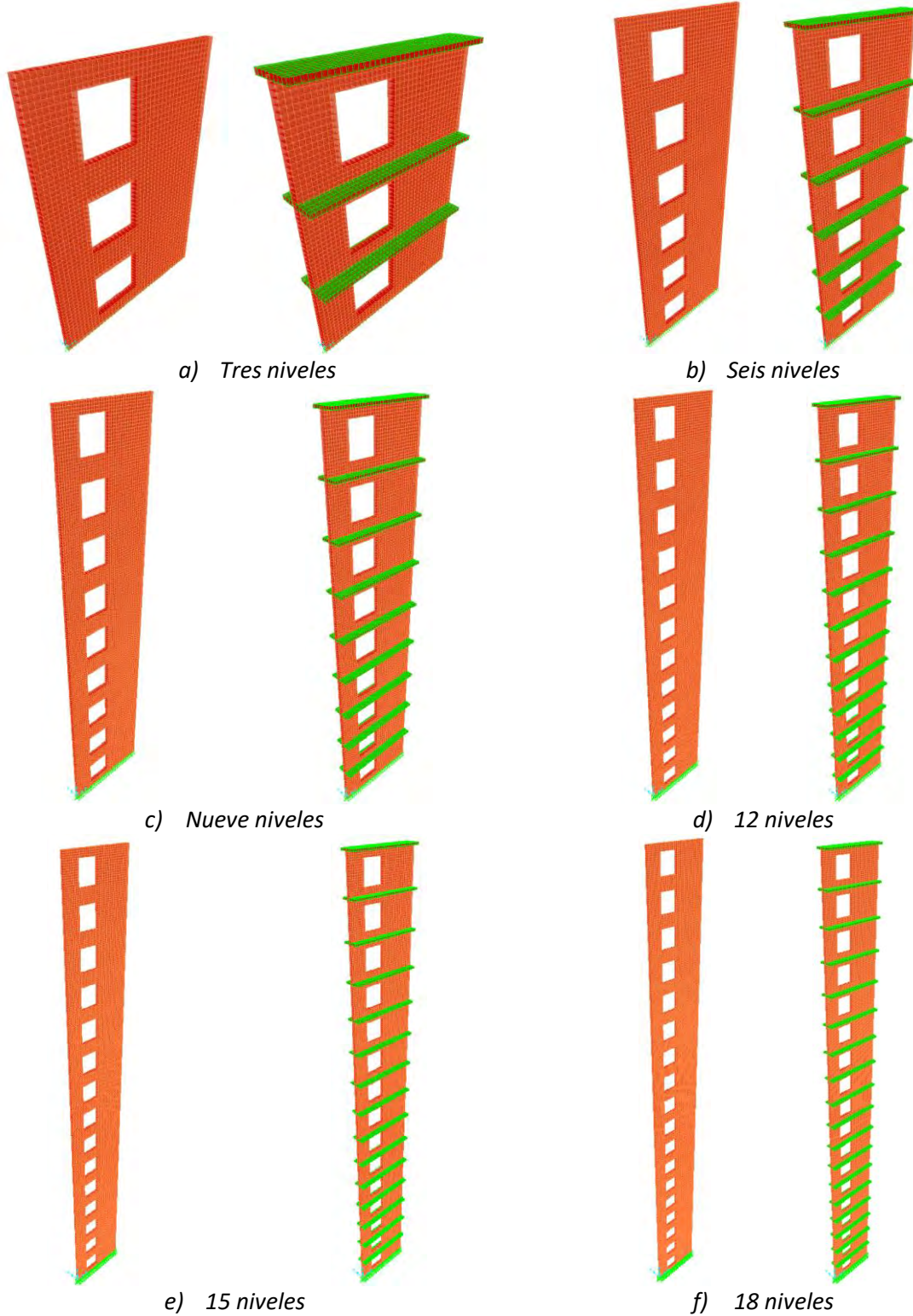


Figura A.2. Vistas de modelos en 3D con y sin losa de todas las alturas de los muros con excentricidad de 40%



A.2.2. Muros con abertura excéntrica del 82%

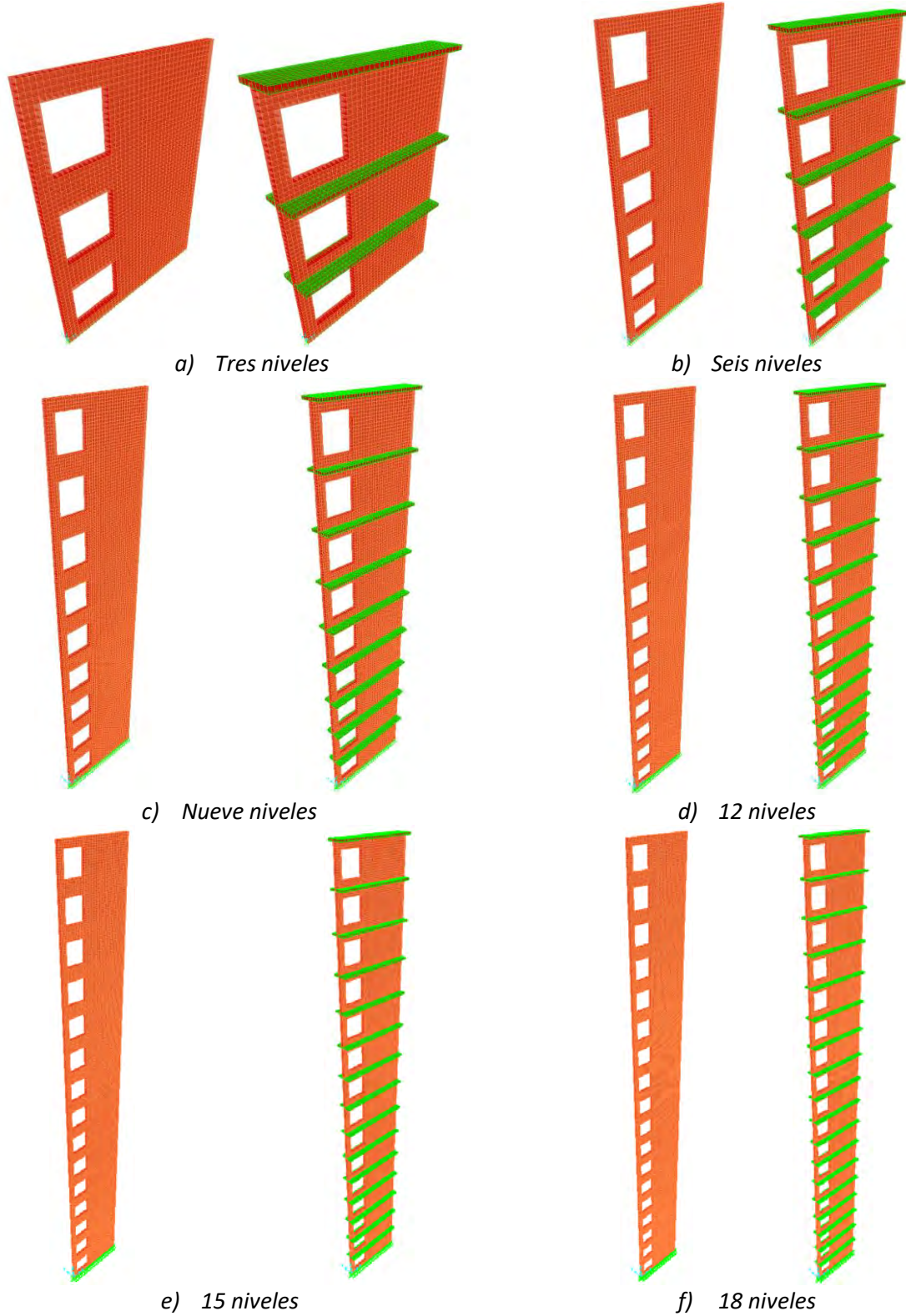


Figura A.3. Vistas de modelos en 3D con y sin losa de todas las alturas de los muros con excentricidad de 82%

## APÉNDICE B. Modelos de muros con múltiples aberturas

### B.1. Muros simétricos RM1

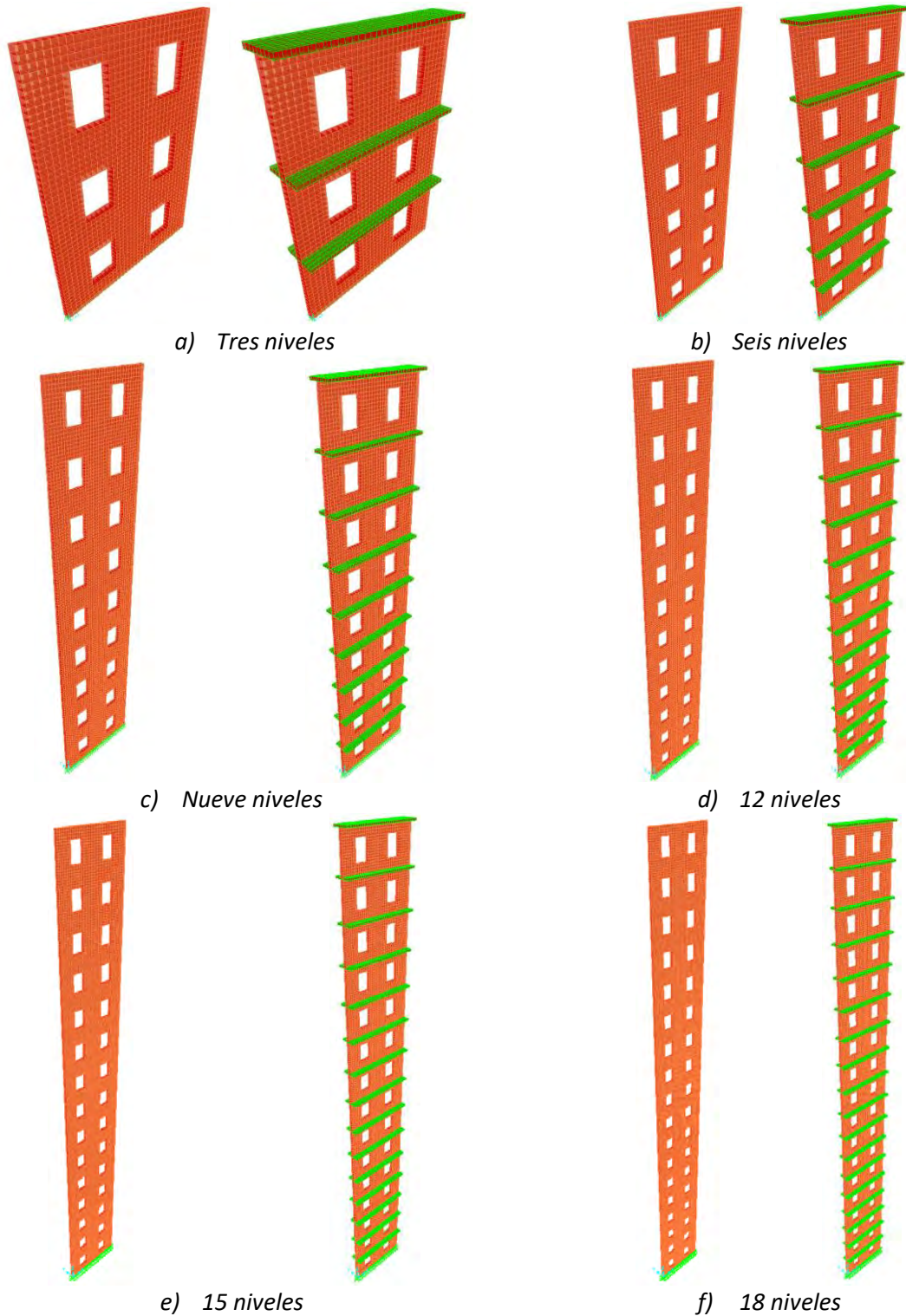


Figura B.1. Vistas de modelos en 3D con y sin losa de todas las alturas de los muros RM1

## B.2. Muros asimétricos RM3

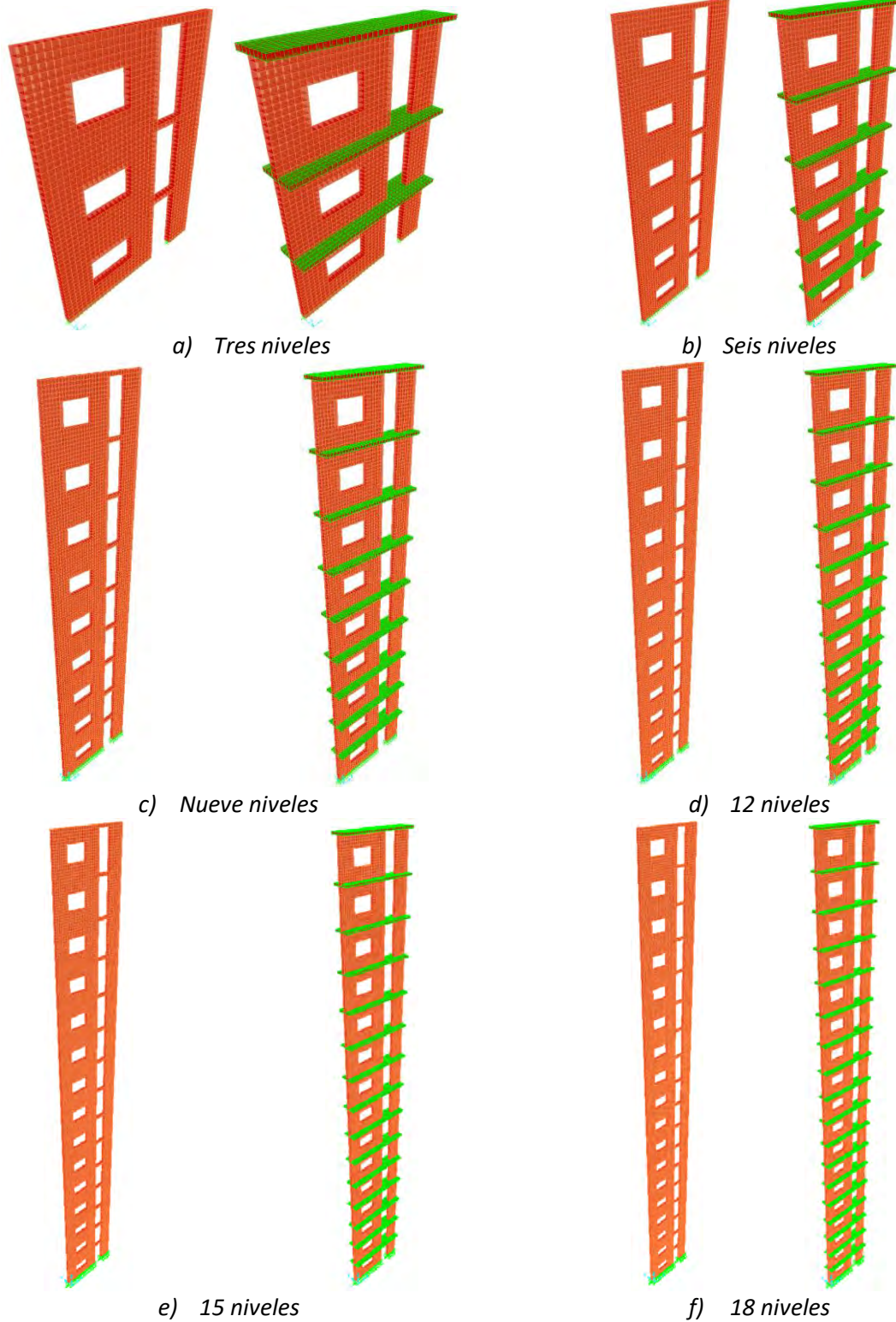


Figura B.2. Vistas de modelos en 3D con y sin losa de todas las alturas de los muros RM3



## APÉNDICE C. Definición de elementos equivalentes (ejemplo)

En ambos métodos estudiados se requiere definir a los muros y losas como columnas y vigas equivalentes. En este apéndice se muestran los valores utilizados que corresponden al muro simétrico de una sola abertura del Capítulo 2.

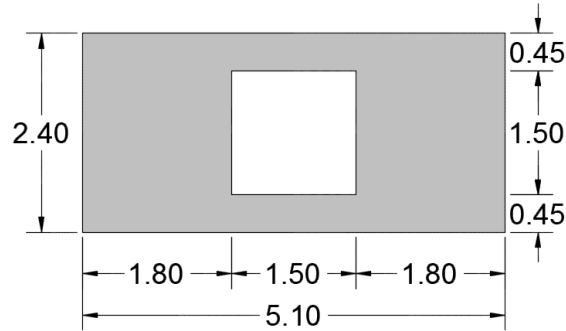


Figura C.1. Características muro simétrico

Cada una de las columnas equivalentes se definieron con las siguientes dimensiones:

$$\text{Ancho: } a_c = 1.80m \quad (C.1)$$

$$\text{Alto: } h_c = 2.40m \quad (C.2)$$

$$\text{Espesor: } t_c = 0.216m \quad (C.3)$$

$$\text{Área: } A_c = a_c * t_c = 0.389m^2 \quad (C.4)$$

$$\text{Inercia: } I_c = \frac{t_c * a_c^3}{12} = 0.105m^4 \quad (C.5)$$

$$\text{Distancia entre ejes de columnas: } l_v = 3.30m \quad (C.6)$$

Vigas en los muros donde no se tomaba en cuenta la presencia del sistema de piso:

$$\text{Ancho: } a_v = 0.216m \quad (C.7)$$

$$\text{Peralte: } h_v = 0.90m \quad (C.8)$$

$$\text{Inercia: } I_p = \frac{a_v * h_v^3}{12} = 0.013m^4 \quad (C.9)$$

Mientras que para los muros que consideran la presencia de las losas se utilizó la ecuación C.10.

$$\text{Inercia: } I_p = 2 * \left[ \frac{a_v * \left( \frac{h_v - t}{2} \right)^3}{12} + a_v * \frac{h_v - t}{2} * \left( \frac{h_v - t}{4} + \frac{t}{2} \right)^2 \right] + \frac{b_L * t^3}{12} \quad (C.10)$$

Donde:

$$t = \text{espesor de la losa} = 0.12m$$

$$\text{Ancho de losa equivalente: } b_L = \frac{E_L}{E} b \quad (C.11)$$

$E_L$  y  $E$  son los módulos elásticos de la losa y el muro respectivamente

$b$  es el ancho de la losa = 0.48m

## APÉNDICE D. Cálculo de aberturas equivalentes

Las medidas de los muros originales estaban dadas en el sistema inglés y eran de modelos a escala, por lo que, como ya se comentó en el *Capítulo 3*, los muros se escalaron a las dimensiones de los muros estudiados en el *Capítulo 2*, de modo que los cálculos realizados y que se presentan a continuación, fueron hechos en *cm* y con tres decimales de precisión.

### D.1. Muro simétrico RM1

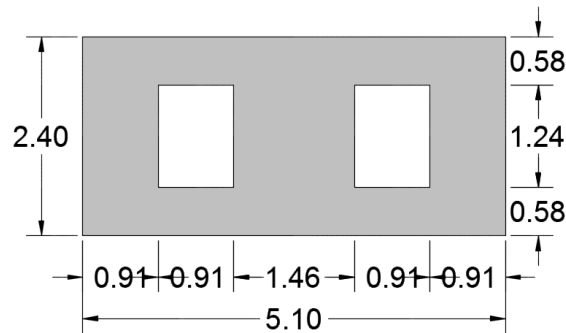


Figura D.1. Características muro RM1

Como se observa, el muro tiene dos aberturas de iguales dimensiones ( $n=2$ ), que son:

$$\text{Ancho:} \quad a_a = 91.135 \text{ cm} \quad (D.1)$$

$$\text{Alto:} \quad h_a = 123.871 \text{ cm} \quad (D.2)$$

$$\text{Área} \quad A_a = a_a h_a = 1.129 \text{ m}^2 \quad (D.3)$$

Cuyas coordenadas centroidales son:

$$x = \frac{A_a(91.135 \text{ cm} + a_a/2) + A_a(510.363 \text{ cm} - 91.135 \text{ cm} - a_a/2)}{nA_a} = 2.552 \text{ m} \quad (D.4)$$

$$y = \frac{A_a(58.064 \text{ cm} + h_a/2) + A_a(58.064 \text{ cm} + h_a/2)}{nA_a} = 1.2 \text{ m} \quad (D.5)$$

#### D.1.1. Propuesta de Rivera (2006)

Se realizaron los pasos como se menciona en la sección 3.2:

- 1) Se forma una sola abertura desplazando las aberturas individuales o partes de ellas (teniendo cuidado de no intercambiarlas o traslaparlas), hasta formar un gran rectángulo con algunos apéndices rectangulares, *Figura D.2*.

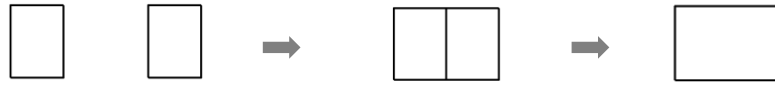


Figura D.2. Obtención de la abertura equivalente del muro RM1 conforme a Rivera (2006)

- 2) El área de la abertura equivalente ( $A_e$ ) es la suma de las áreas individuales:

$$A_e = A_a n = 2.258m^2 \quad (D.6)$$

- 3) Se calcula el área del rectángulo mayor y sus apéndices ( $A_i$ ). Para este caso, resultan las mismas áreas:

$$A_i = 2a_a h_a = 2.258m^2 \quad (D.7)$$

- 4) La proporción largo-alto de la abertura equivalente se obtiene calculando un promedio pesado de las alturas y largos de la nueva discretización:

$$\frac{L'_e}{H'_e} = \frac{2a_a A_i}{h_a A_i} = 1.471 \quad (D.8)$$

- 5) Las dimensiones de la abertura quedan dadas por las fórmulas:

$$L_e = \sqrt{A_e \frac{L'_e}{H'_e}} = 182.27cm \quad y \quad H_e = \sqrt{A_e \frac{H'_e}{L'_e}} = 123.871cm \quad (D.9)$$

- 6) El centroide de la nueva abertura se ubica en el centroide de las aberturas originales.

Por lo que la abertura equivalente resultante es la mostrada en la Figura D.3.

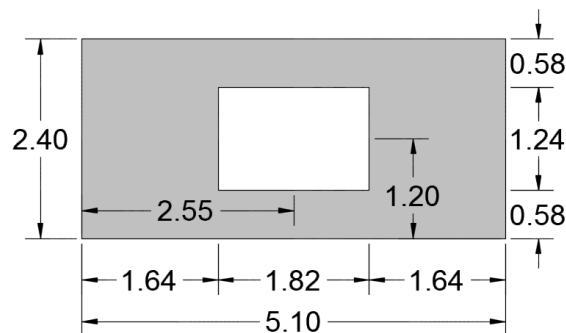


Figura D.3. Dimensiones y ubicación de la abertura equivalente del muro RM1

#### D.1.2. Propuesta nueva

La nueva propuesta se aplicó como se explica en la sección 3.2:

- 1) El área de la abertura equivalente es la suma de las áreas de las aberturas reales:

$$A_e = A_a n = 2.258 m^2 \quad (D.10)$$

- 2) La altura de la abertura equivalente es el promedio de las alturas de las aberturas reales:

$$H_e = \frac{h_a n}{n} = 123.871 cm \quad (D.11)$$

- 3) La longitud de la abertura equivalente se obtiene en proporción al área de ésta:

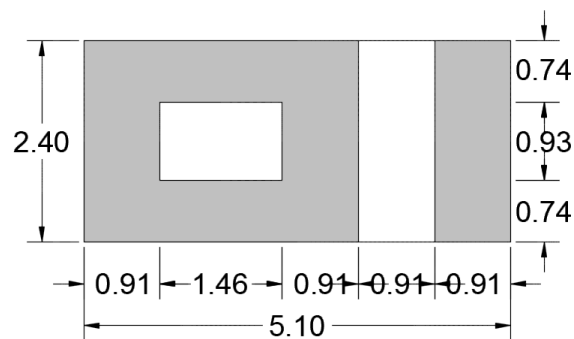
$$L_e = \frac{A_e}{H_e} = 182.27 cm \quad (D.12)$$

- 4) La abertura equivalente se ubicó en el centroide de las aberturas originales.

De modo que tanto las dimensiones, como la ubicación de la abertura coinciden para ambas propuestas, resultando en el muro de la *Figura D.3*.

## D.2. Muro asimétrico RM3

Como se observa, el muro también tiene dos aberturas (*Figura D.4*), pero a diferencia del anterior, las dimensiones de éstas son diferentes.



*Figura D.4. Características de muro RM3*

*Abertura 1:*

Ancho:  $a_{a1} = 145.822 cm \quad (D.13)$

Alto:  $h_{a1} = 92.903 cm \quad (D.14)$

Área:  $A_{a1} = a_{a1} h_{a1} = 1.355 m^2 \quad (D.15)$

Abertura 2:

$$\text{Ancho: } a_{a2} = 91.135\text{cm} \quad (D.16)$$

$$\text{Alto: } h_{a2} = 240\text{cm} \quad (D.17)$$

$$\text{Área } A_{a2} = a_{a2}h_{a2} = 2.187\text{m}^2 \quad (D.18)$$

Cuyas coordenadas centroidales son:

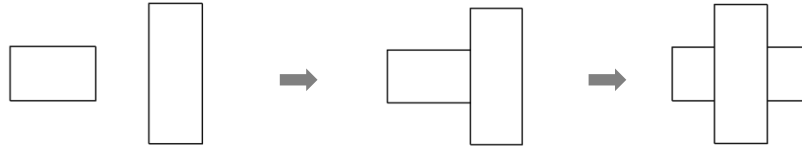
$$x = \frac{A_{a1}(91.135\text{cm} + a_{a1}/2) + A_{a2}(510.363\text{cm} - 91.135\text{cm} - a_{a2}/2)}{A_{a1} + A_{a2}} = 2.935\text{m} \quad (D.19)$$

$$y = \frac{A_{a1}(73.548\text{cm} + h_{a1}/2) + A_{a2}h_{a2}/2}{A_{a1} + A_{a2}} = 1.2\text{m} \quad (D.20)$$

D.2.1. Propuesta de Rivera (2006)

Se realizaron los pasos tal cual se mencionan en la sección 3.2:

- 1) Se forma una sola abertura desplazando las aberturas individuales o partes de ellas (teniendo cuidado de no intercambiarlas o traslaparlas), hasta formar un gran rectángulo con algunos apéndices rectangulares, *Figura D.5*.



*Figura D.5. Obtención de la abertura equivalente del muro RM3 conforme a Rivera (2006)*

- 2) El área de la abertura equivalente ( $A_e$ ) es la suma de las áreas individuales:

$$A_e = A_{a1} + A_{a2} = 3.542\text{m}^2 \quad (D.21)$$

- 3) Se calcula el área del rectángulo mayor y sus apéndices ( $A_i$ ). Que para este caso resultan las mismas áreas. En este caso, al ser sólo dos aberturas, el área tanto del rectángulo, como de los apéndices, resultan en las áreas originales:

$$A_1 = A_{a1} = 1.355\text{m}^2 \quad A_2 = A_{a2} = 2.187\text{m}^2 \quad (D.22)$$

- 4) La proporción largo-alto de la abertura equivalente se obtiene calculando un promedio pesado de las alturas y largos de la nueva discretización:



$$\frac{L'_e}{H'_e} = \frac{a_{a1}A_1 + a_{a2}A_2}{h_{a1}A_1 + h_{a2}A_2} = 0.61 \quad (D.23)$$

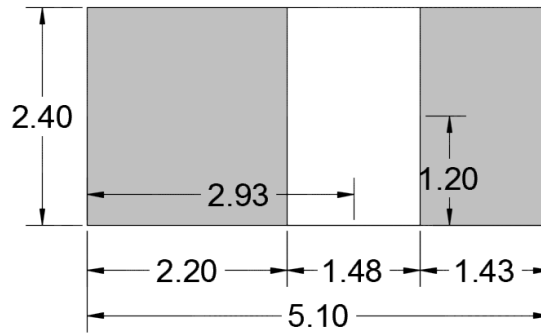
5) Las dimensiones de la abertura se obtienen con las fórmulas:

$$L_e = \sqrt{A_e \frac{L'_e}{H'_e}} = 146.971 \text{ cm} \quad y \quad H_e = \sqrt{A_e \frac{H'_e}{L'_e}} = 240.998 \text{ cm} \quad (D.24)$$

Se observa que la altura de la abertura es ligeramente mayor que la dimensión del muro (240 cm), por lo que se optó por fijar la altura a la dimensión del muro y calcular el ancho.

$$H_e = 240 \text{ cm} \quad \frac{L'_e}{H'_e} = \frac{A_e}{H_e^2} = 0.615 \quad L_e = \sqrt{A_e \frac{L'_e}{H'_e}} = 147.583 \text{ cm} \quad (D.25)$$

6) El centroide de la nueva abertura se ubica en el centroide de las aberturas originales, por lo que la abertura equivalente resultante es la mostrada en la *Figura D.6*.



*Figura D.6. Dimensiones y ubicación de la abertura equivalente del muro RM3 conforme a Rivera (2006)*

#### D.2.2. Propuesta nueva

La nueva propuesta se aplicó como se explica en la *sección 3.2*:

a) El área de la abertura equivalente es la suma de las áreas de las aberturas reales:

$$A_e = A_{a1} + A_{a2} = 3.542 \text{ m}^2 \quad (D.26)$$

b) La altura de la abertura equivalente es el promedio de las alturas de las aberturas reales:

$$H_e = \frac{h_{a1} + h_{a2}}{2} = 166.452 \text{ cm} \quad (D.27)$$

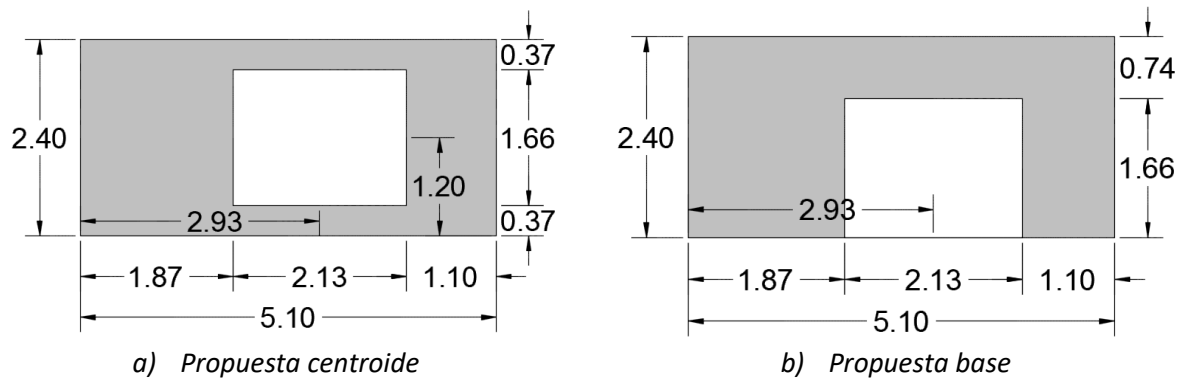
c) La longitud de la abertura equivalente se obtiene en proporción al área de ésta:

$$L_e = \frac{A_e}{H_e} = 212.793 \text{ cm} \quad (D.28)$$

d) La abertura equivalente se ubicó:

- En el centroide de las aberturas originales (propuesta centroide, *Figura D.7a*).
- En el centroide de las aberturas reales en la dirección longitudinal del muro, pero en la altura se ubicará en la base del muro (propuesta base, *Figura D.7b*).

Resultando las aberturas equivalentes mostradas en la *Figura D.7*.



*Figura D.7. Dimensiones y ubicación de las aberturas equivalentes del muro RM3 conforme a la nueva propuesta*

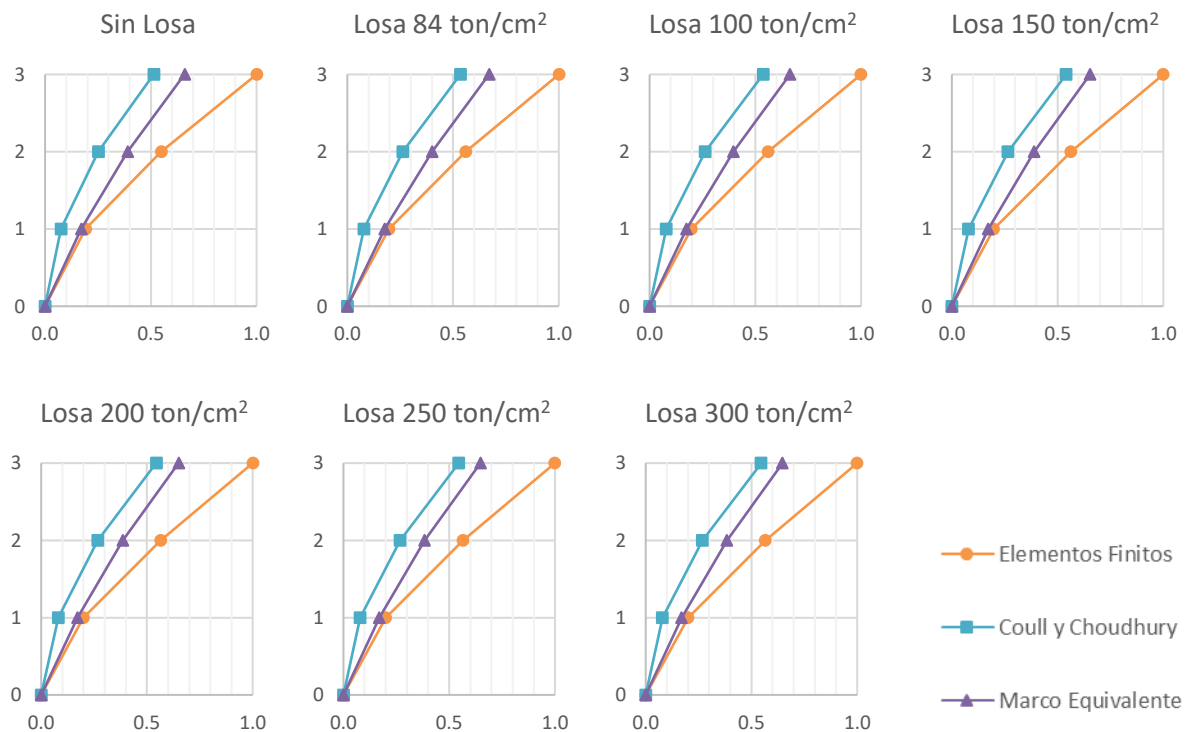
## APÉNDICE E. Curvas de resultados de muros con una sola fila de aberturas

Todas las gráficas contenidas en esta sección, al igual que en el *CAPÍTULO 2*, muestran las curvas Número de niveles -  $\Delta/\Delta_{azoteaFEM}$  obtenidas en este trabajo.

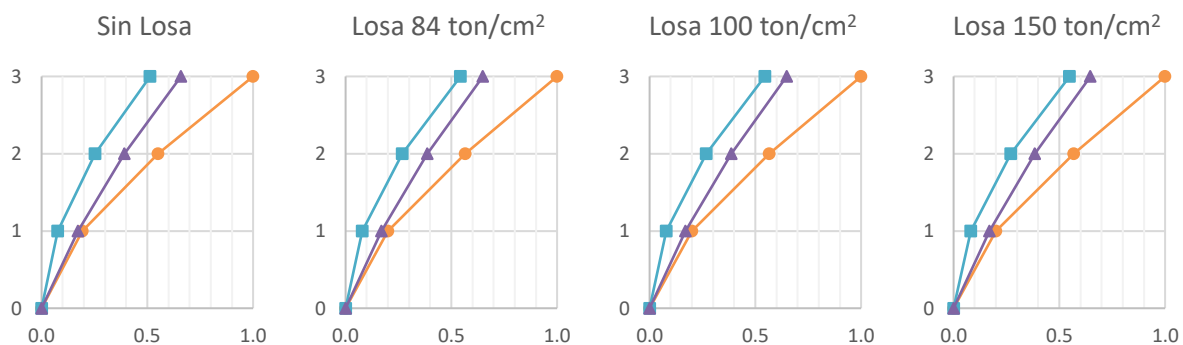
### E.1. Simétricos

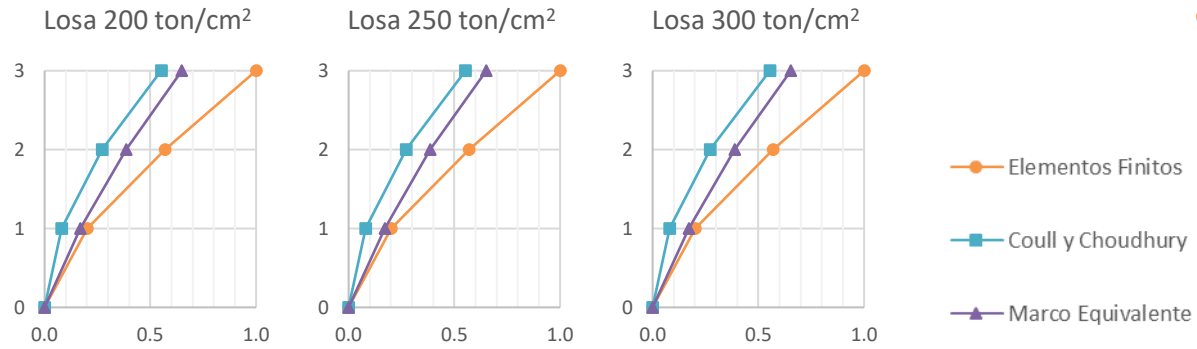
#### E.1.1. Muros de tres niveles

##### Mampostería con $E = 84 \text{ ton/cm}^2$

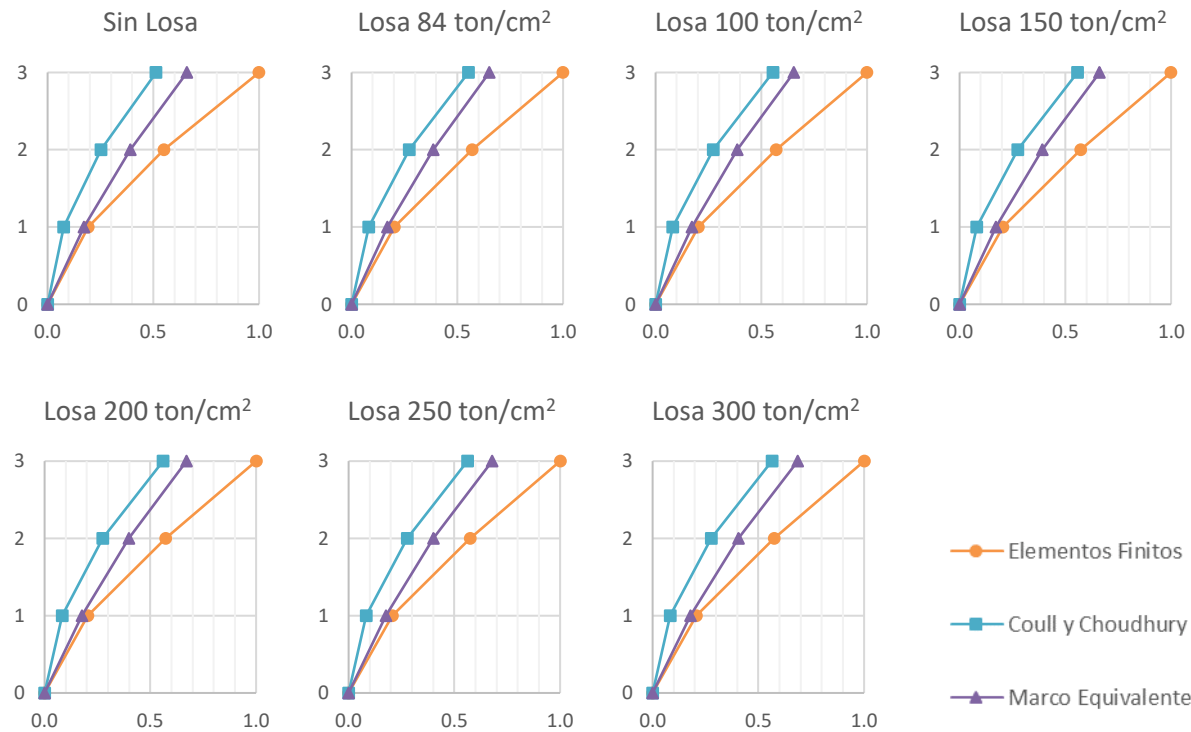


##### Mampostería con $E = 36 \text{ ton/cm}^2$



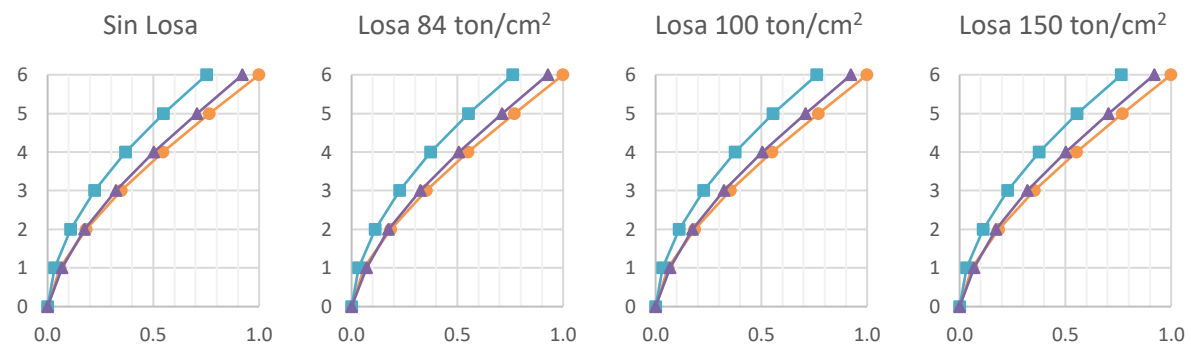


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

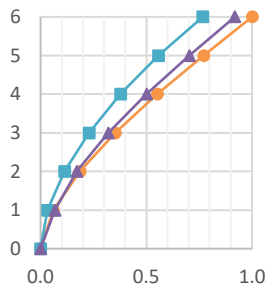


*E.1.2. Muros de seis niveles*

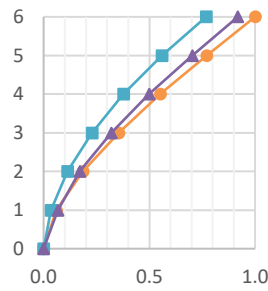
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



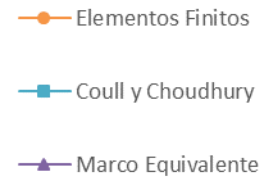
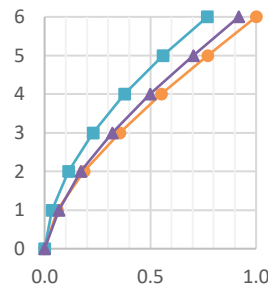
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>

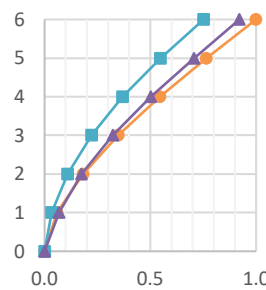


Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>

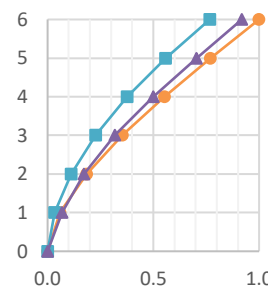


Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

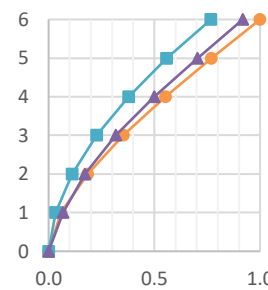
Sin Losa



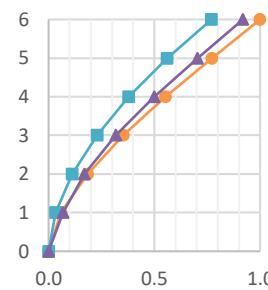
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



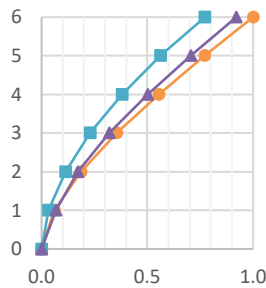
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



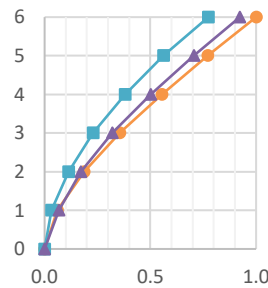
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



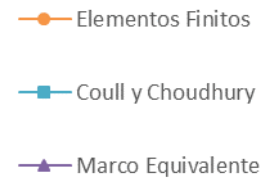
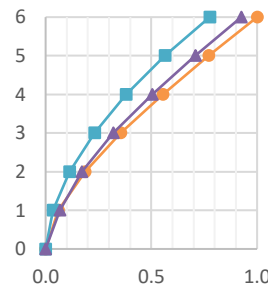
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>

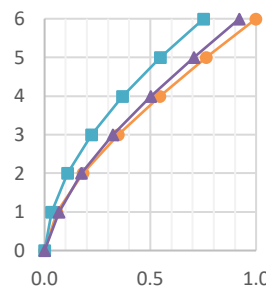


Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>

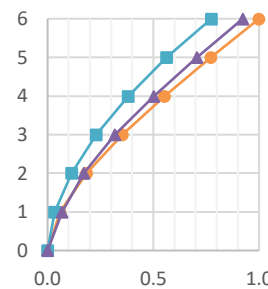


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

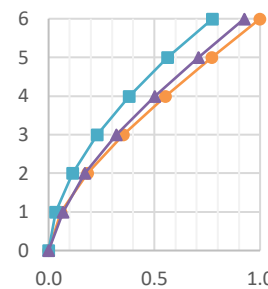
Sin Losa



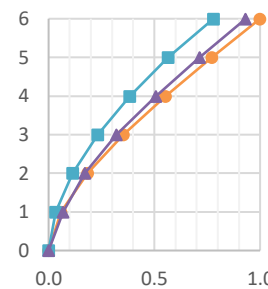
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>

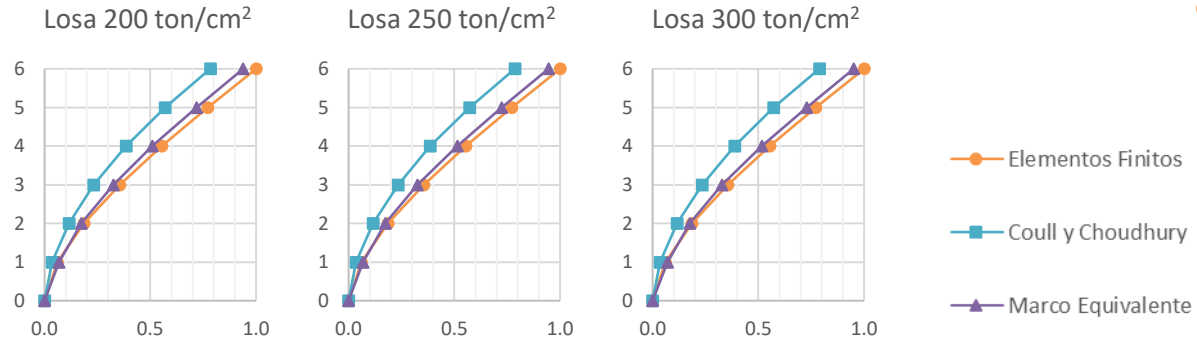


Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



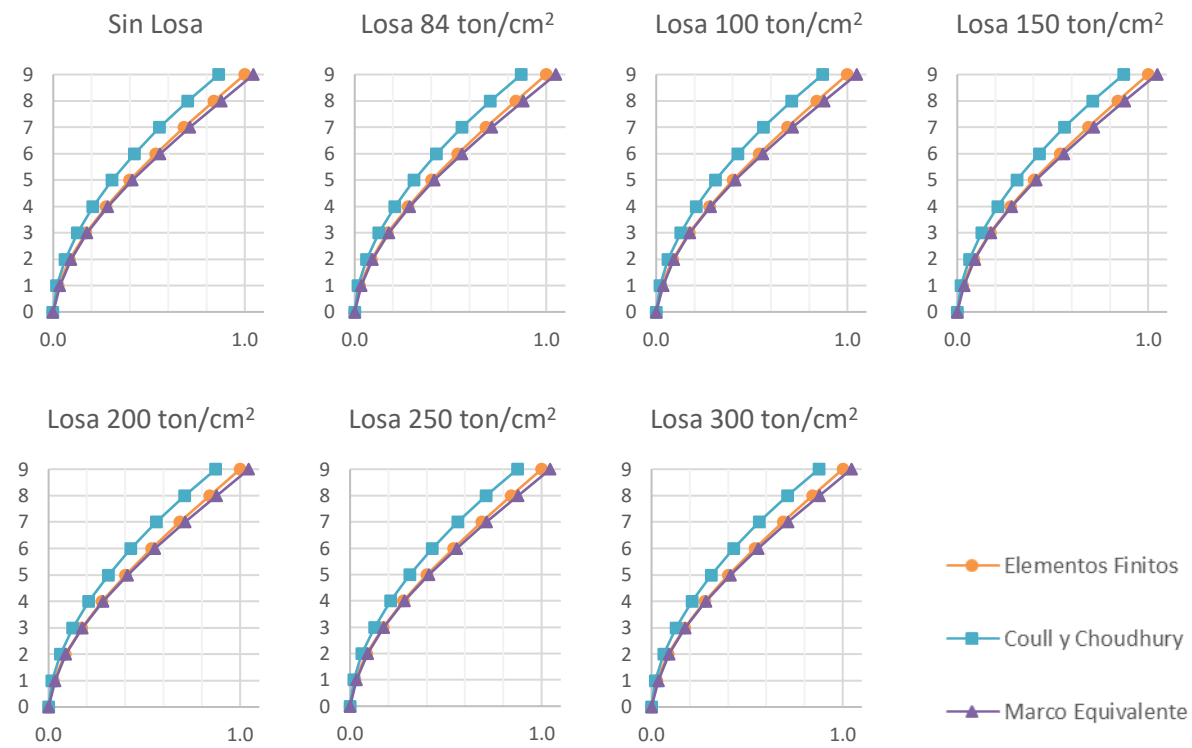
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



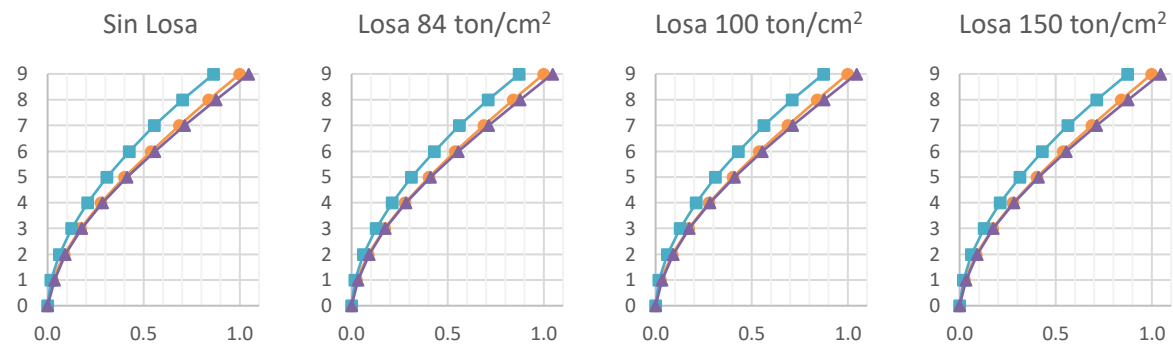


### E.1.3. Muros de nueve niveles

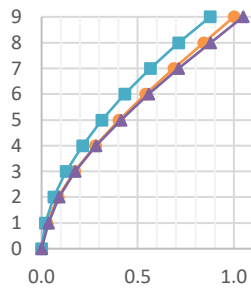
#### Mampostería con $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



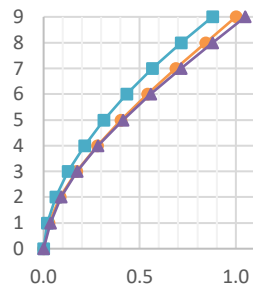
#### Mampostería con $E = 36 \text{ ton/cm}^2$



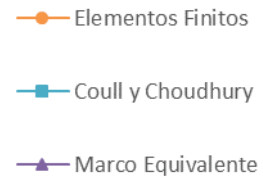
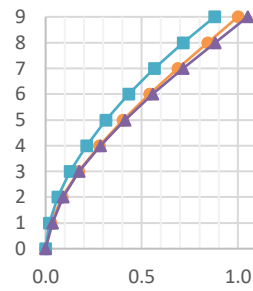
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>

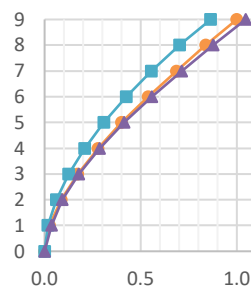


Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>

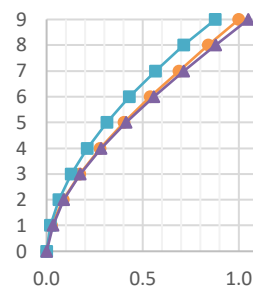


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

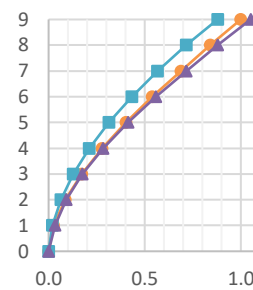
Sin Losa



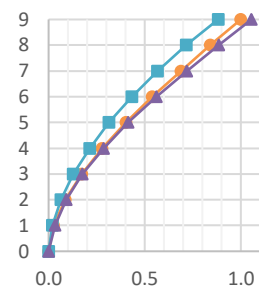
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



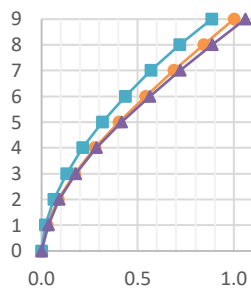
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



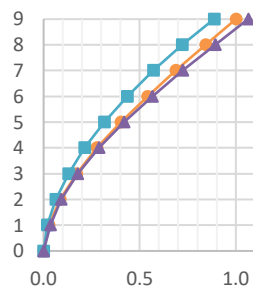
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



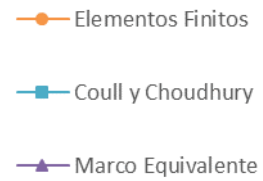
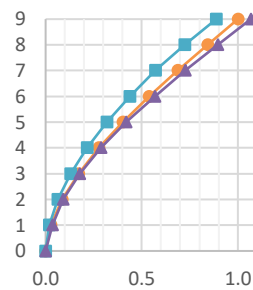
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>



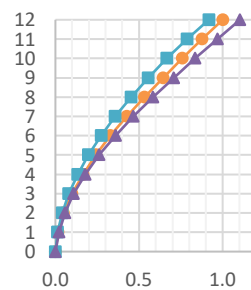
Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>



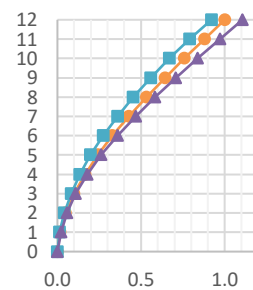
*E.1.4. Muros de 12 niveles*

Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$

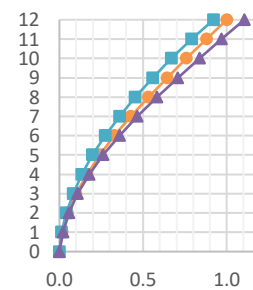
Sin Losa



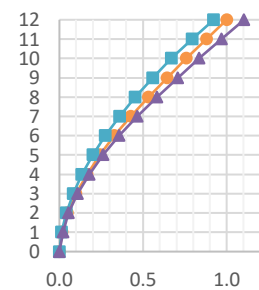
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



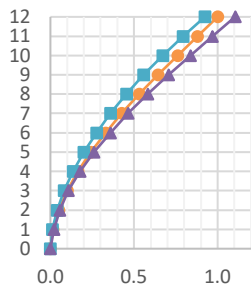
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



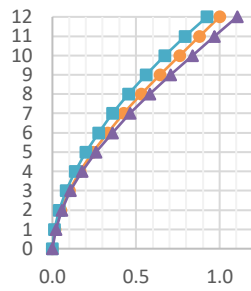
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



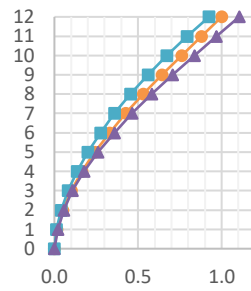
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>



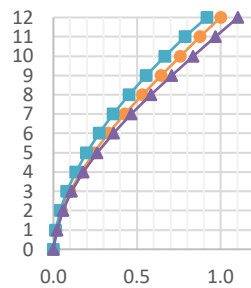
Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>



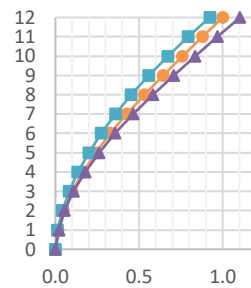
- Elementos Finitos
- Coull y Choudhury
- ▲— Marco Equivalente

Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

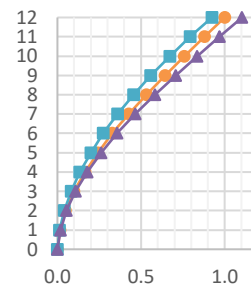
Sin Losa



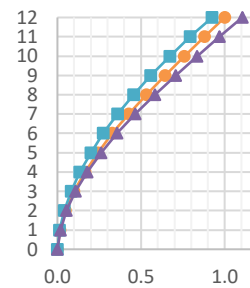
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



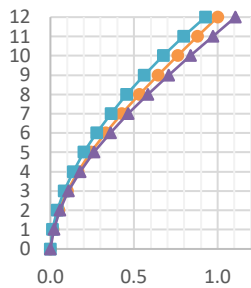
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



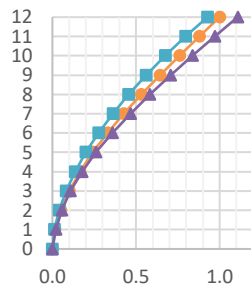
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



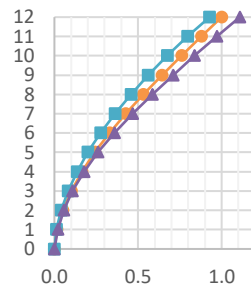
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>



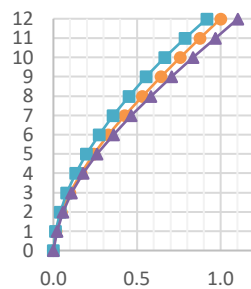
Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>



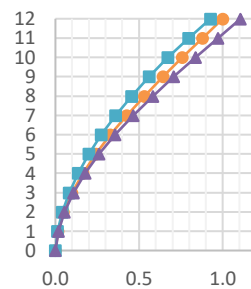
- Elementos Finitos
- Coull y Choudhury
- ▲— Marco Equivalente

Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

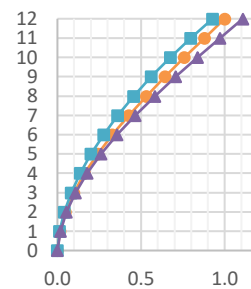
Sin Losa



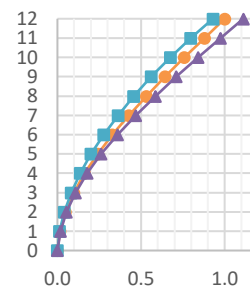
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



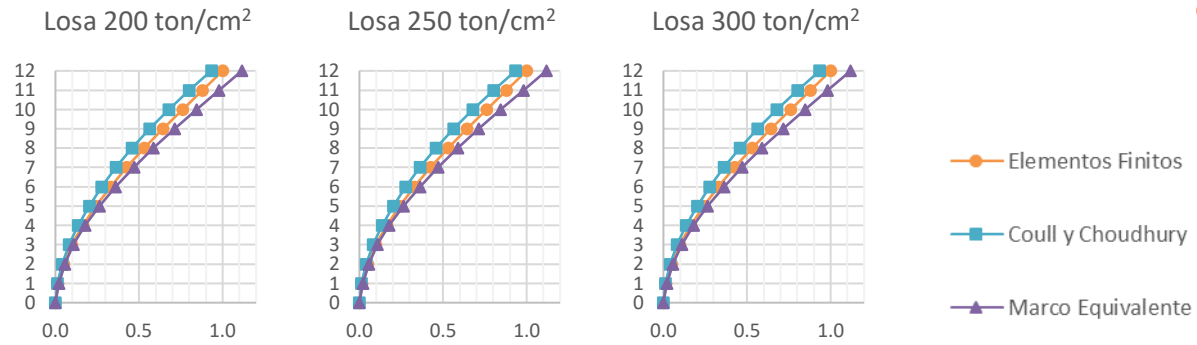
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>

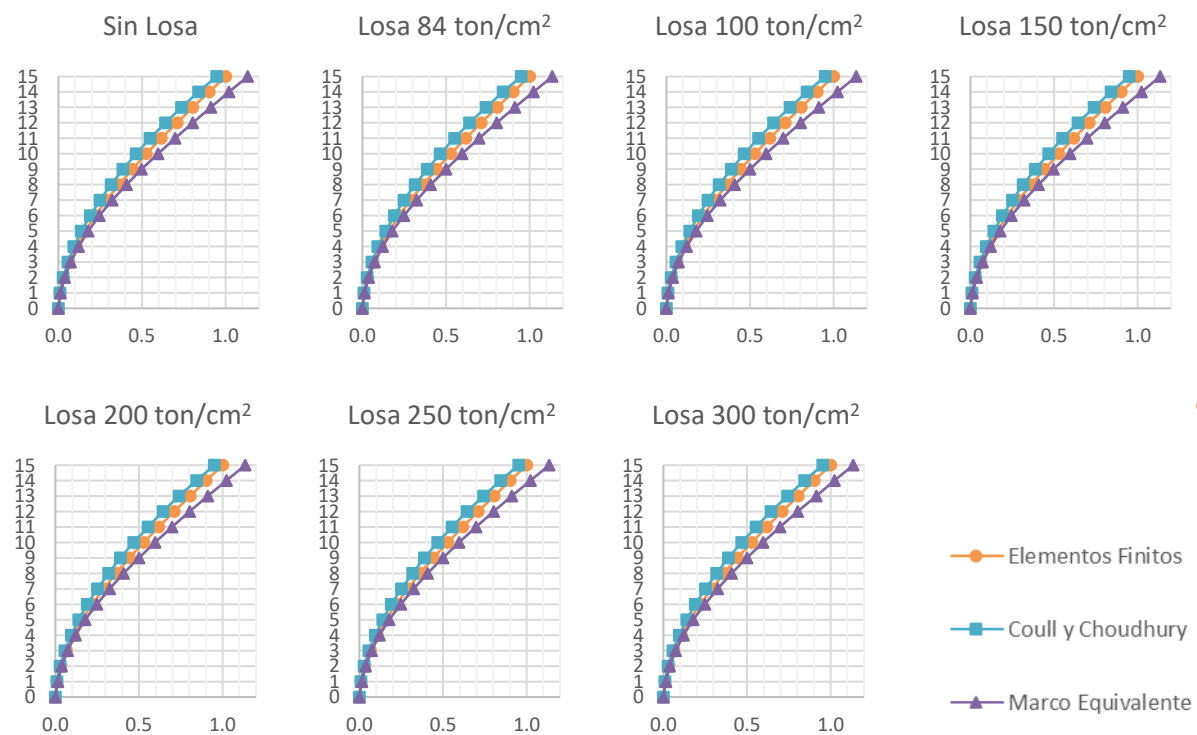




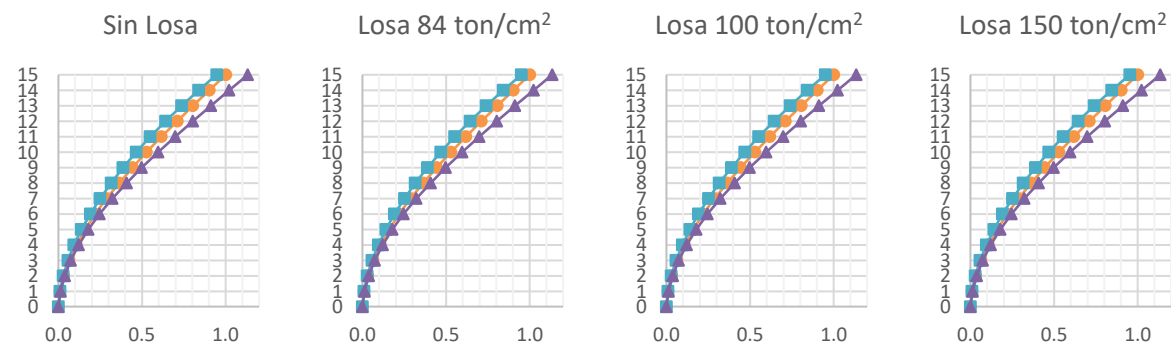


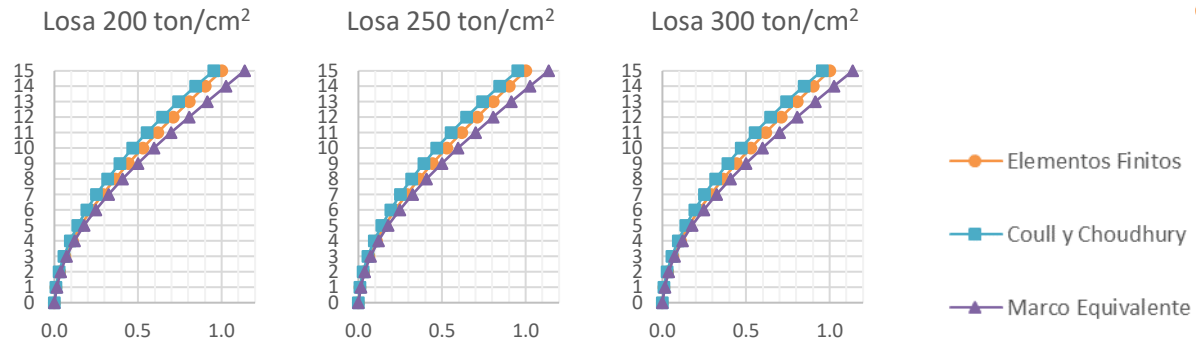
### E.1.5. Muros de 15 niveles

#### Mampostería con $E = 84 \text{ ton/cm}^2$

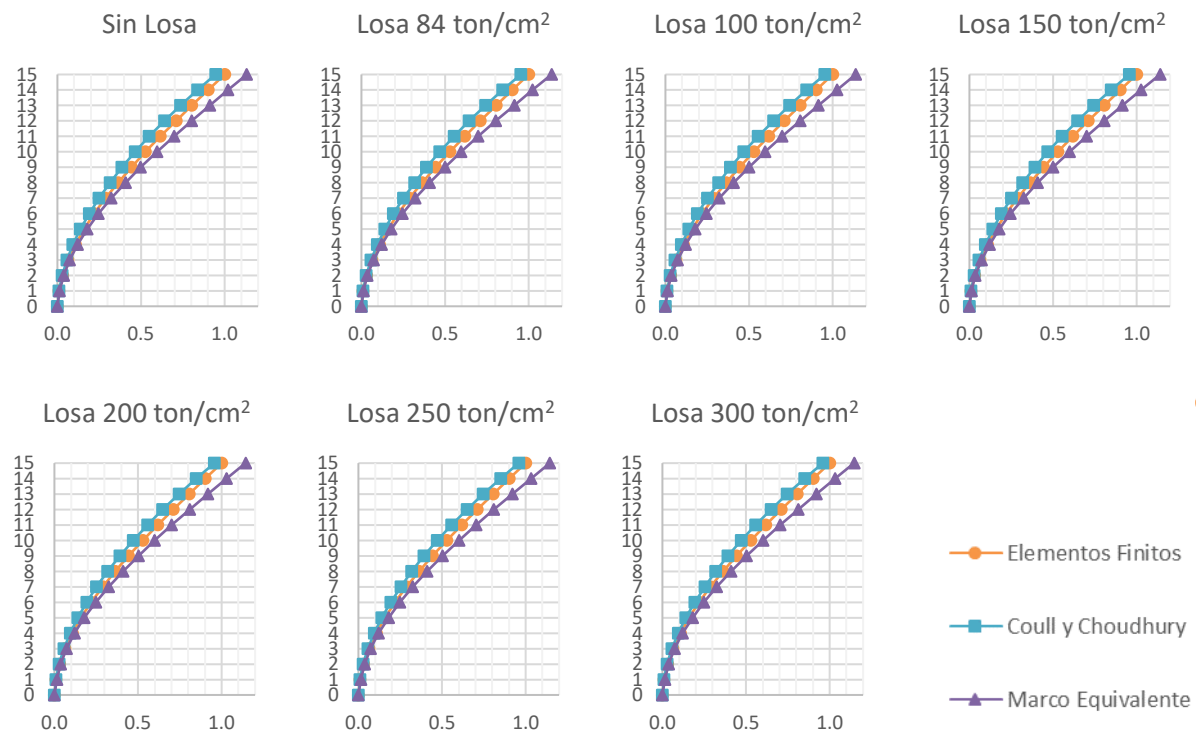


#### Mampostería con $E = 36 \text{ ton/cm}^2$



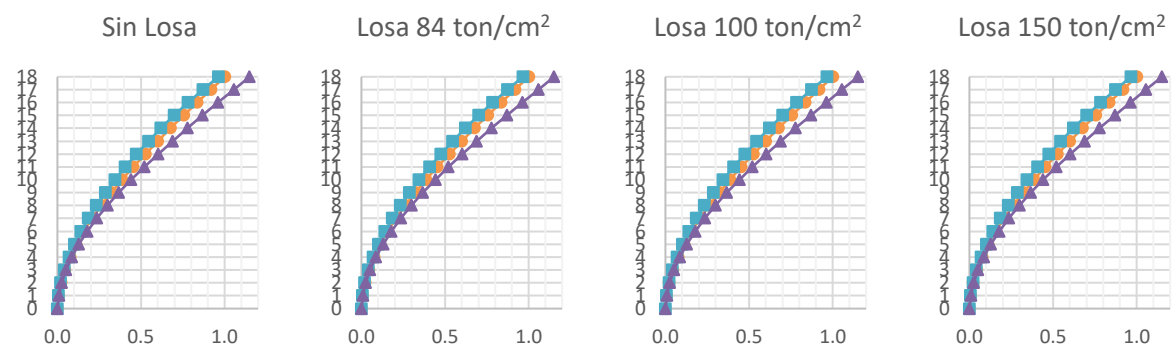


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

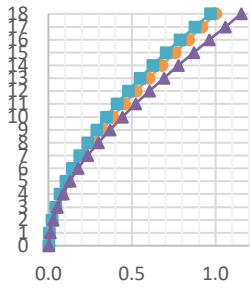


E.1.6. Muros de 18 niveles

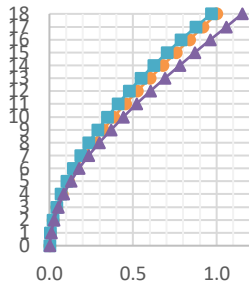
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



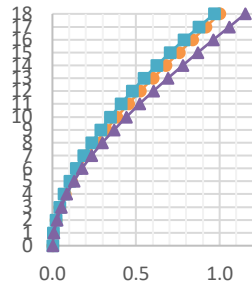
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>



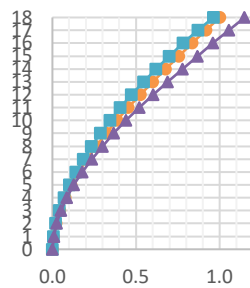
Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>



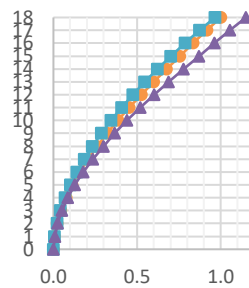
- Elementos Finitos
- Coull y Choudhury
- ▲— Marco Equivalente

Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

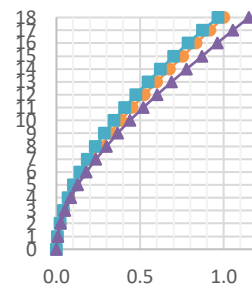
Sin Losa



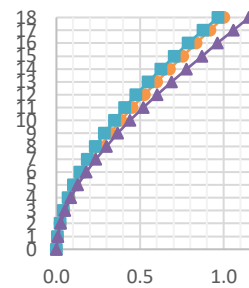
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



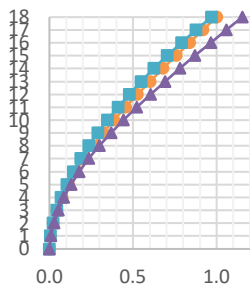
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



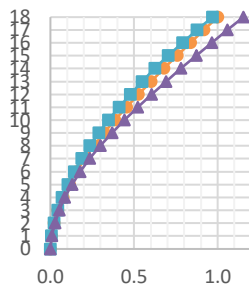
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



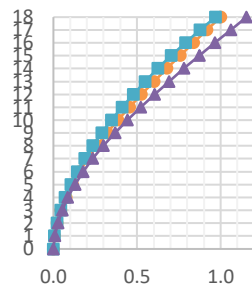
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>



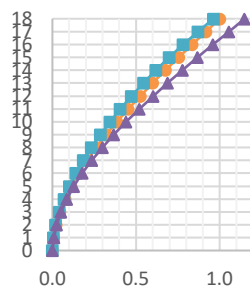
Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>



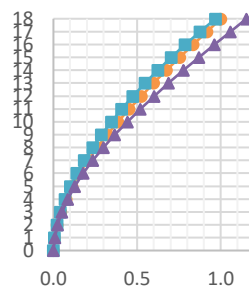
- Elementos Finitos
- Coull y Choudhury
- ▲— Marco Equivalente

Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

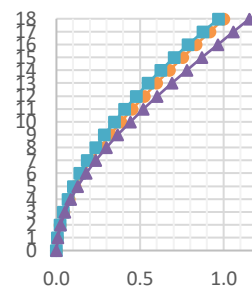
Sin Losa



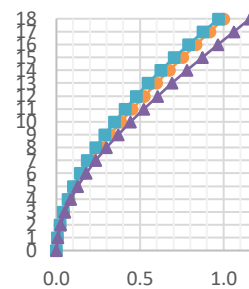
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



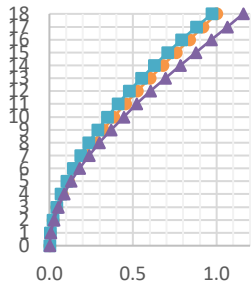
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



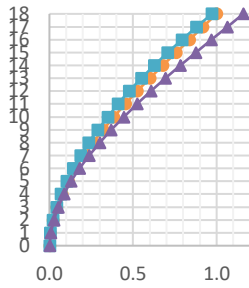
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



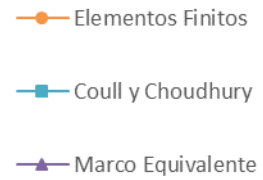
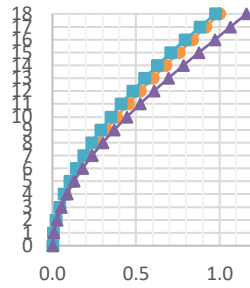
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>



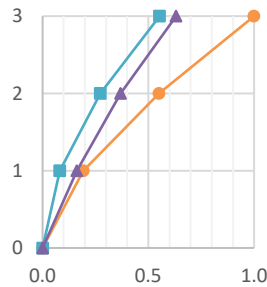
## E.2. Asimétricos

### E.2.1. Muros con abertura excéntrica del 40%

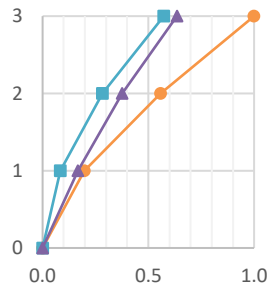
#### E.2.1.1. Muros de tres niveles

Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$

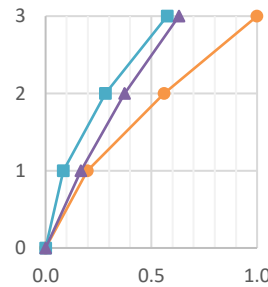
Sin Losa



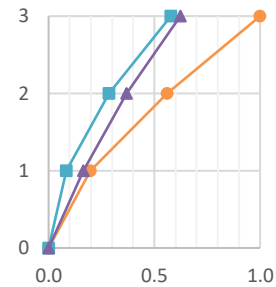
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



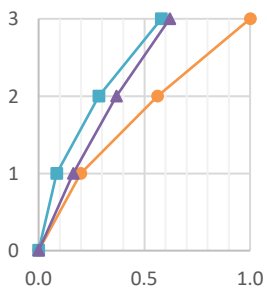
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



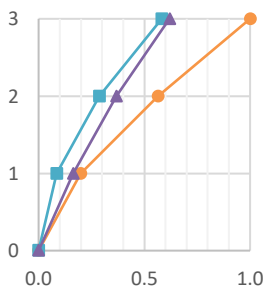
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



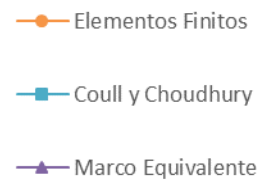
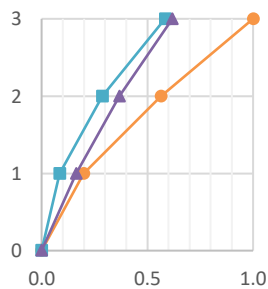
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



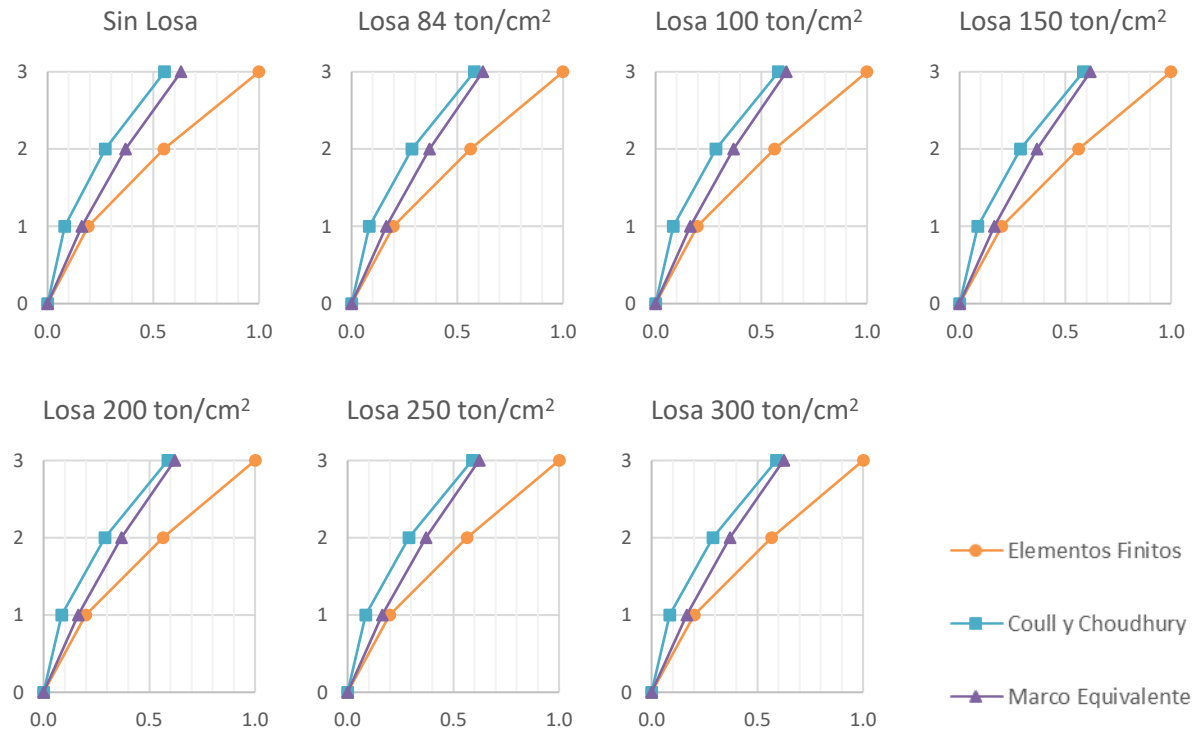
Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>



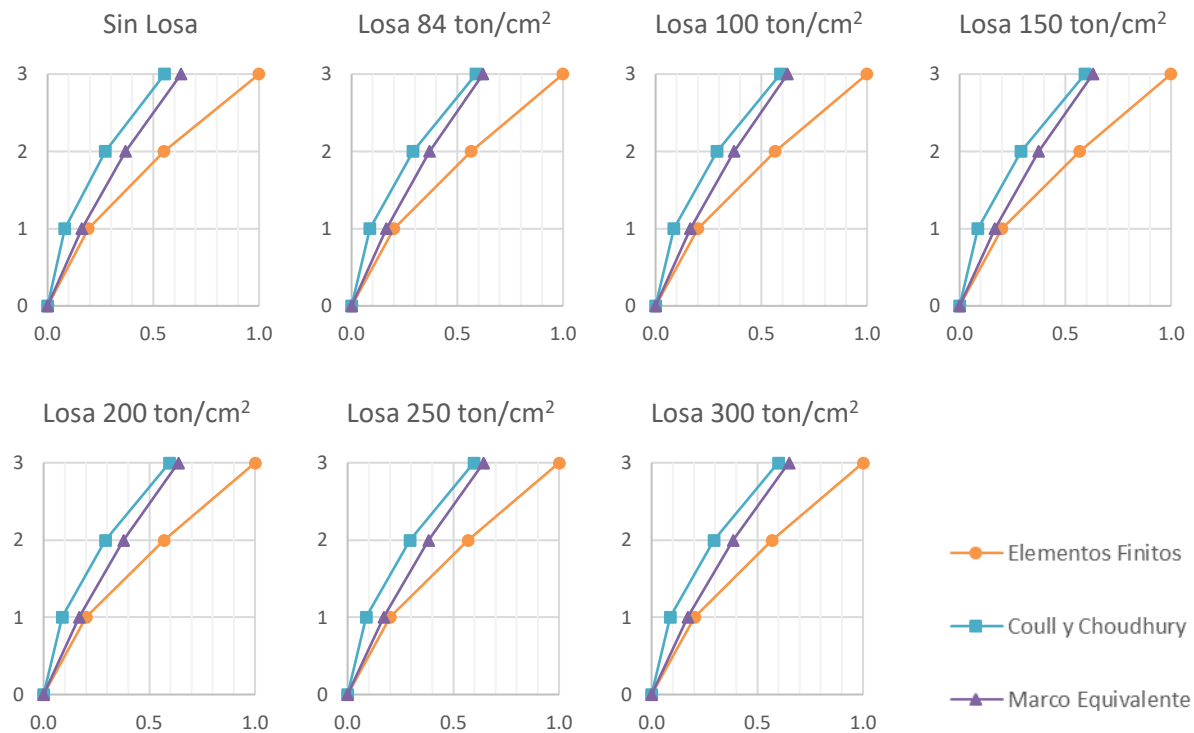
Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

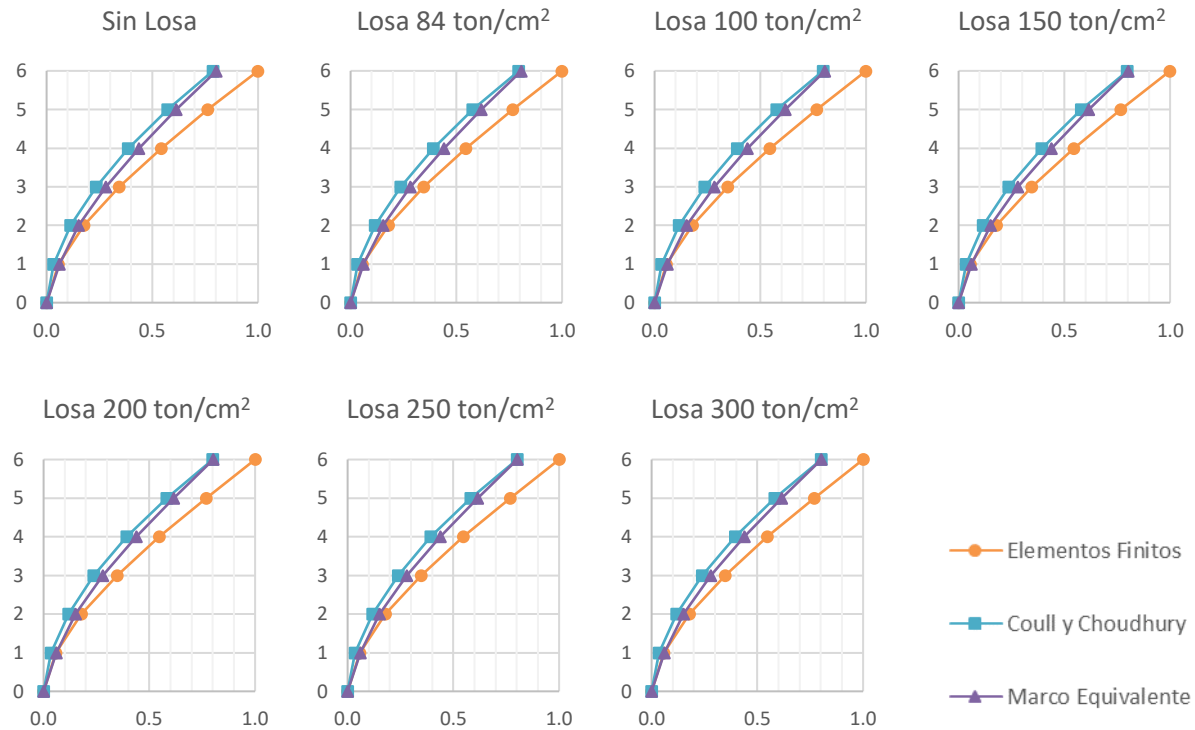


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

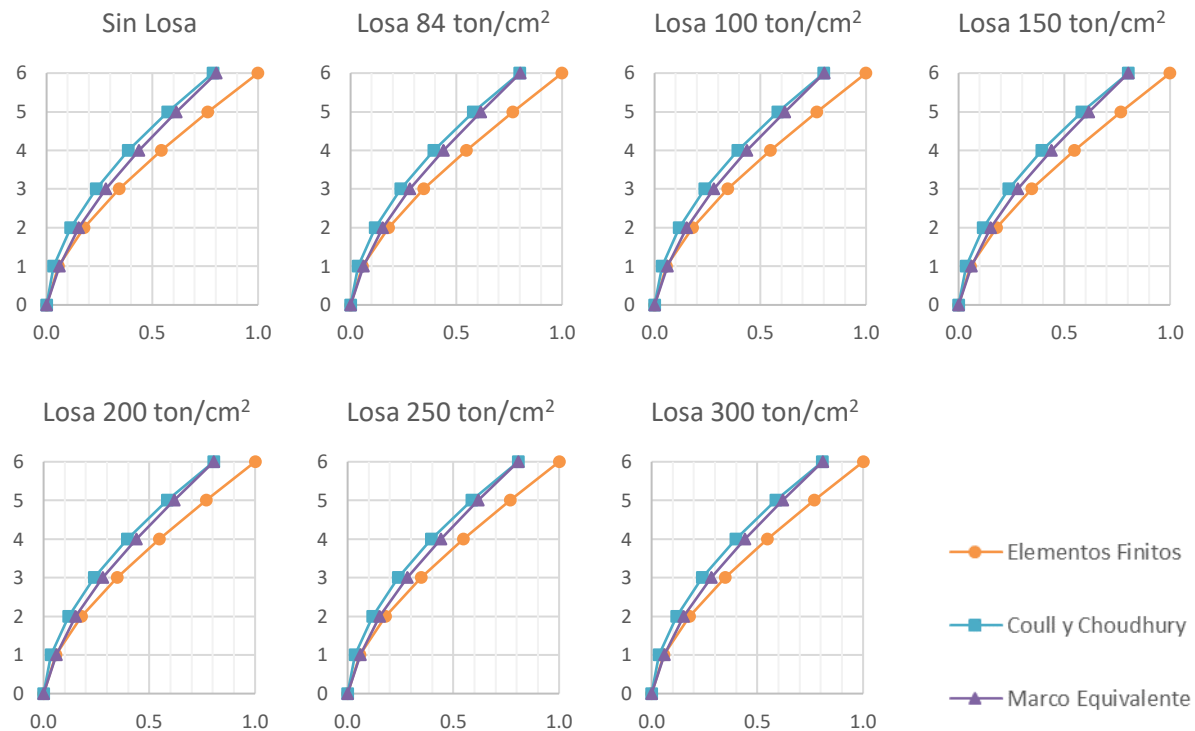


E.2.1.2. Muros de seis niveles

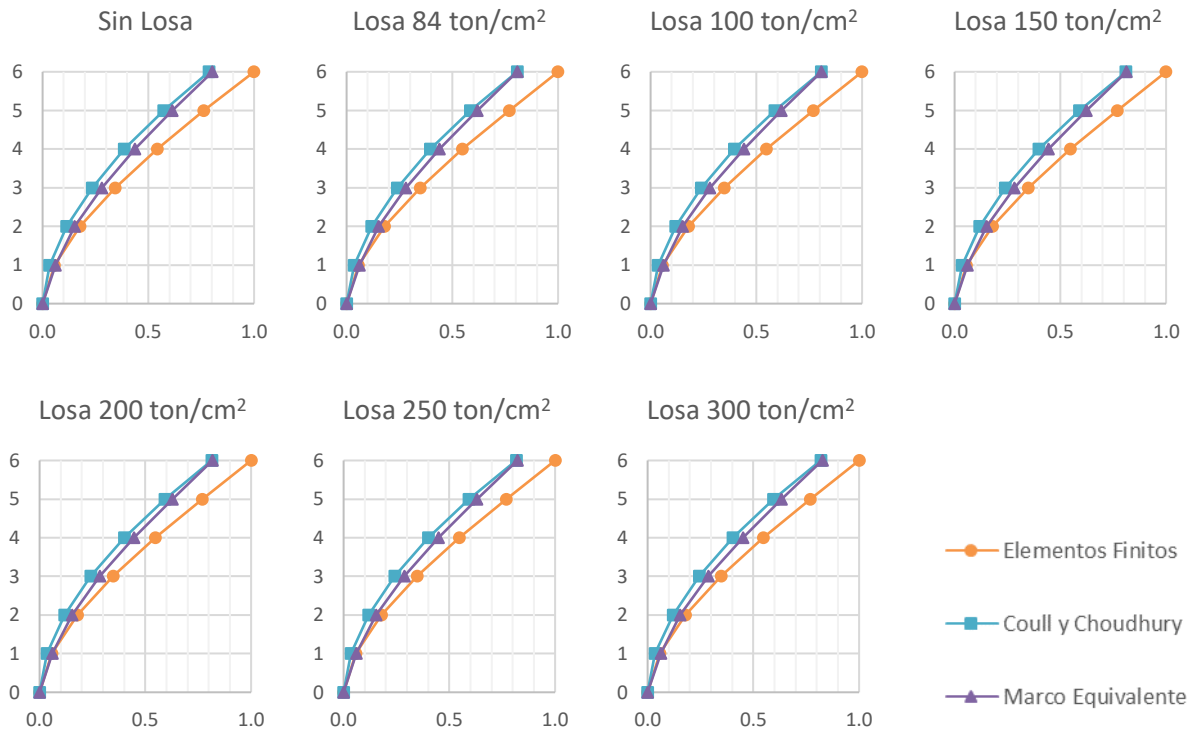
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

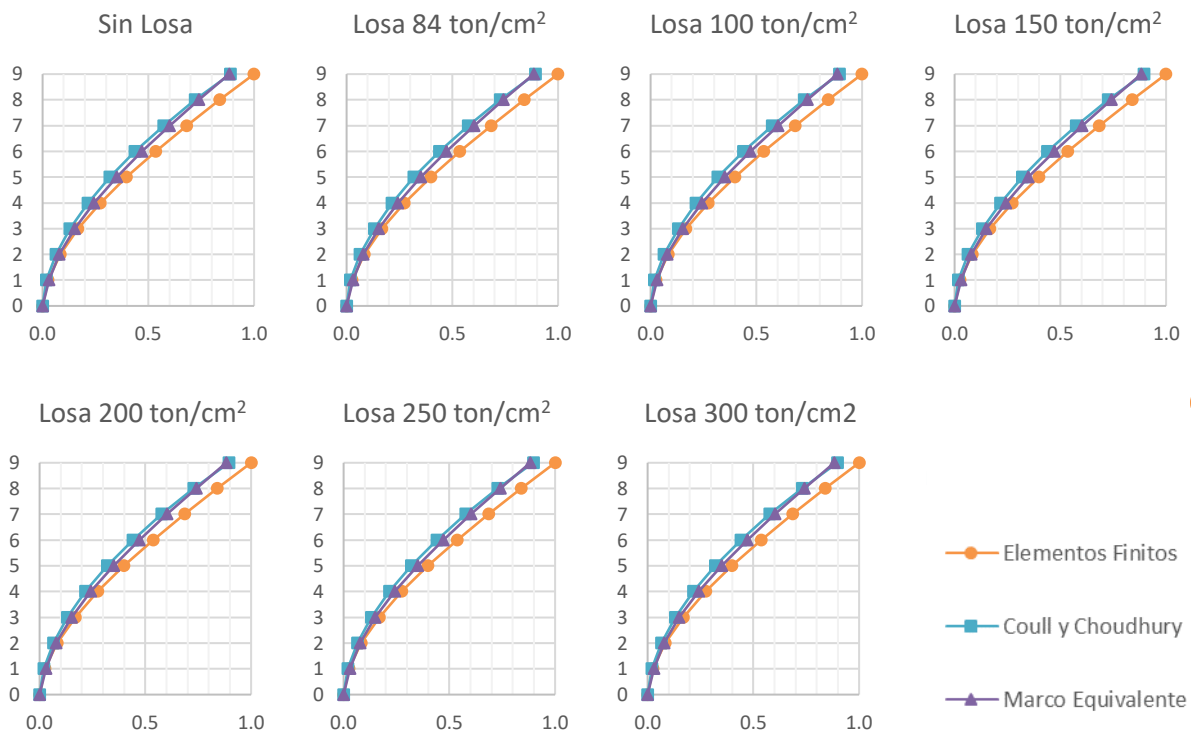


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

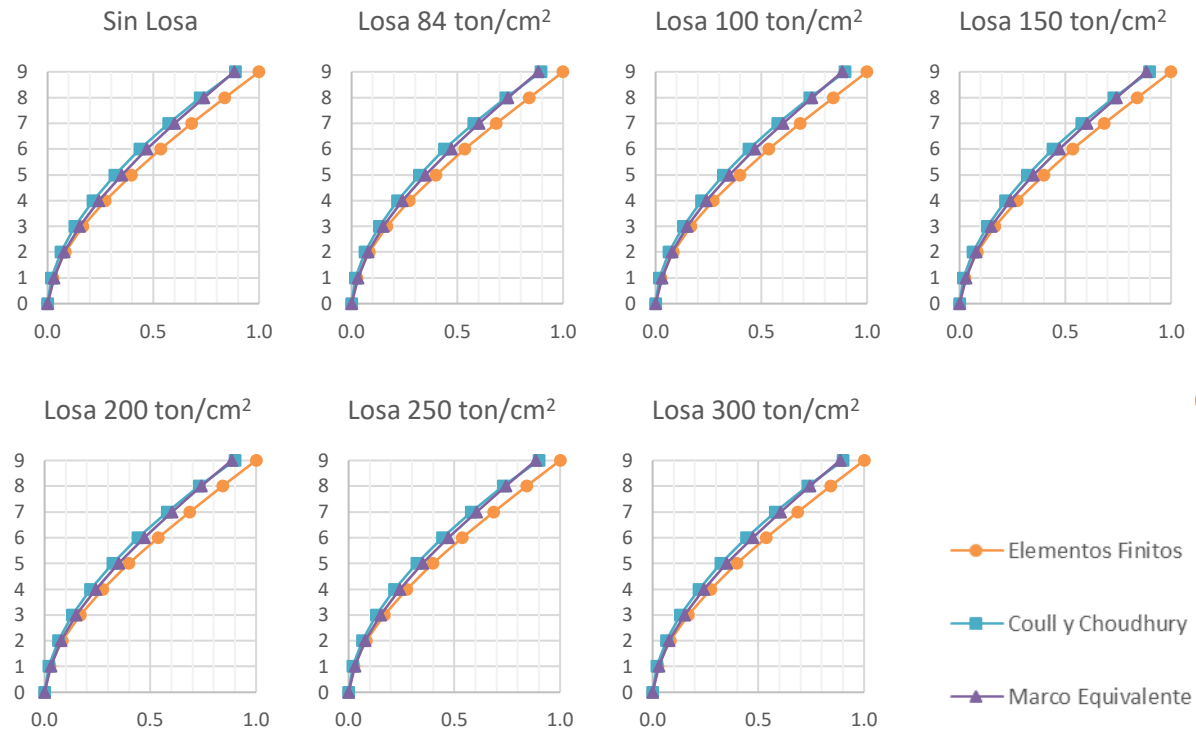


E.2.1.3. *Muros de nueve niveles*

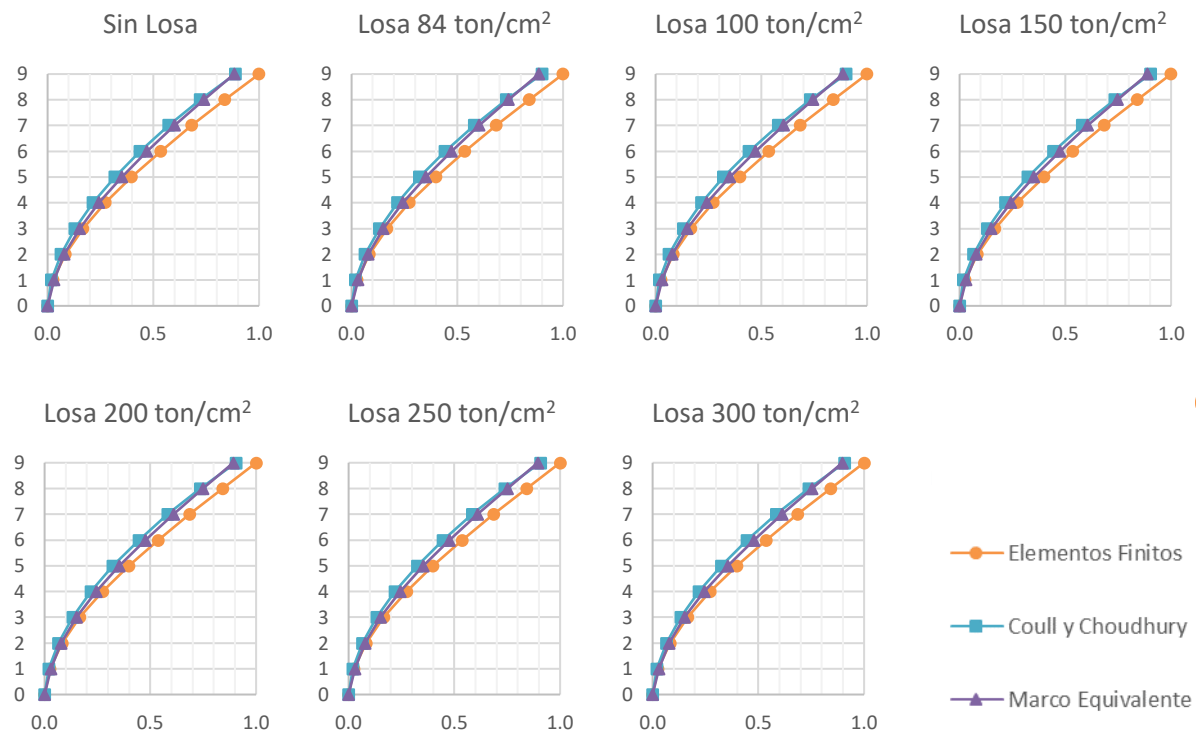
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$



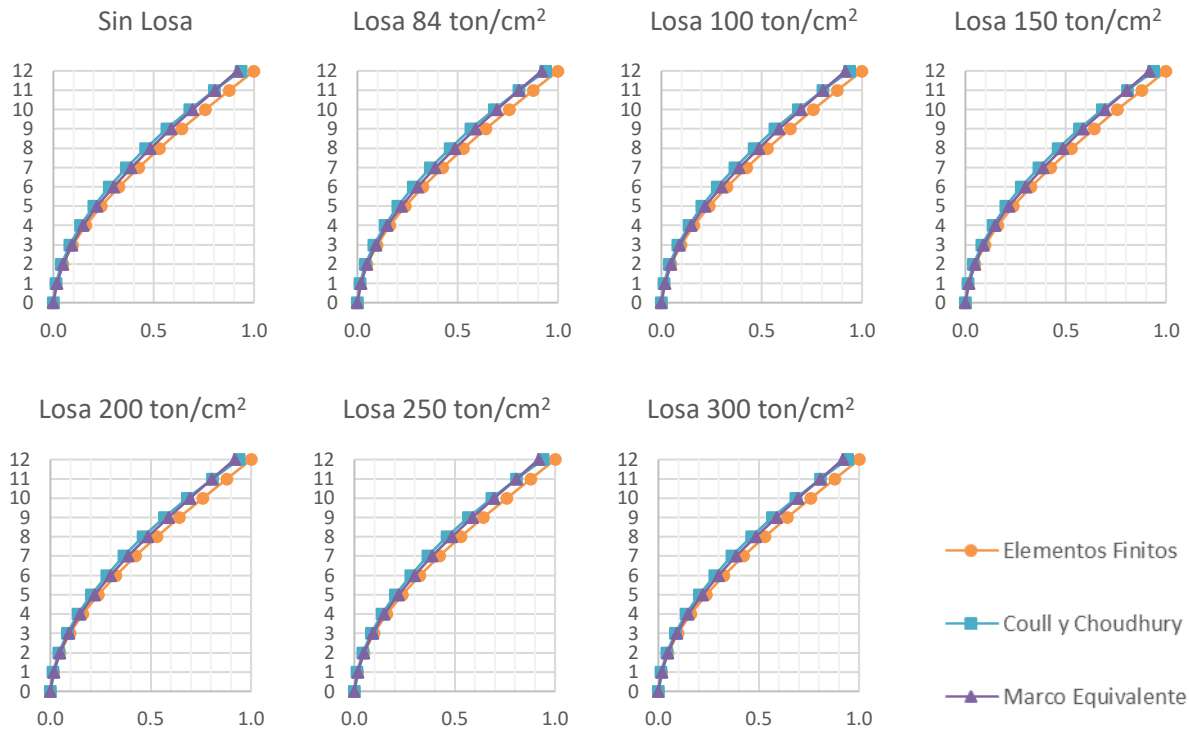
Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$



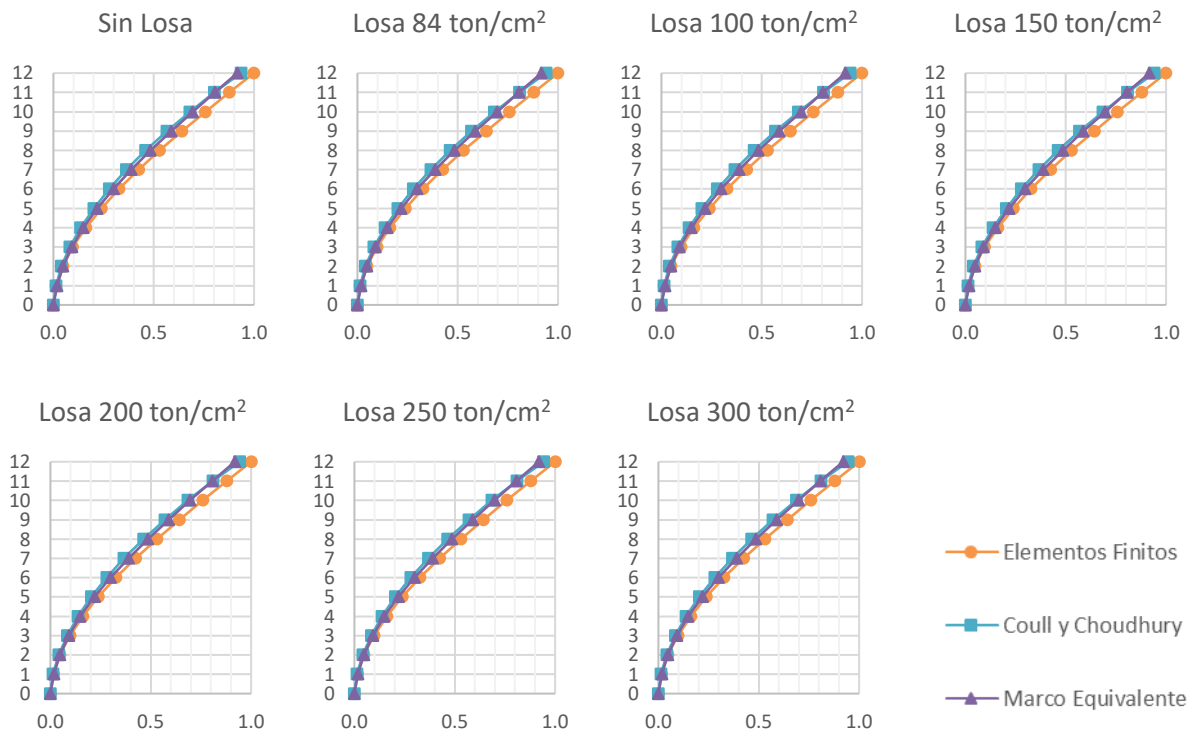


E.2.1.4. Muros de 12 niveles

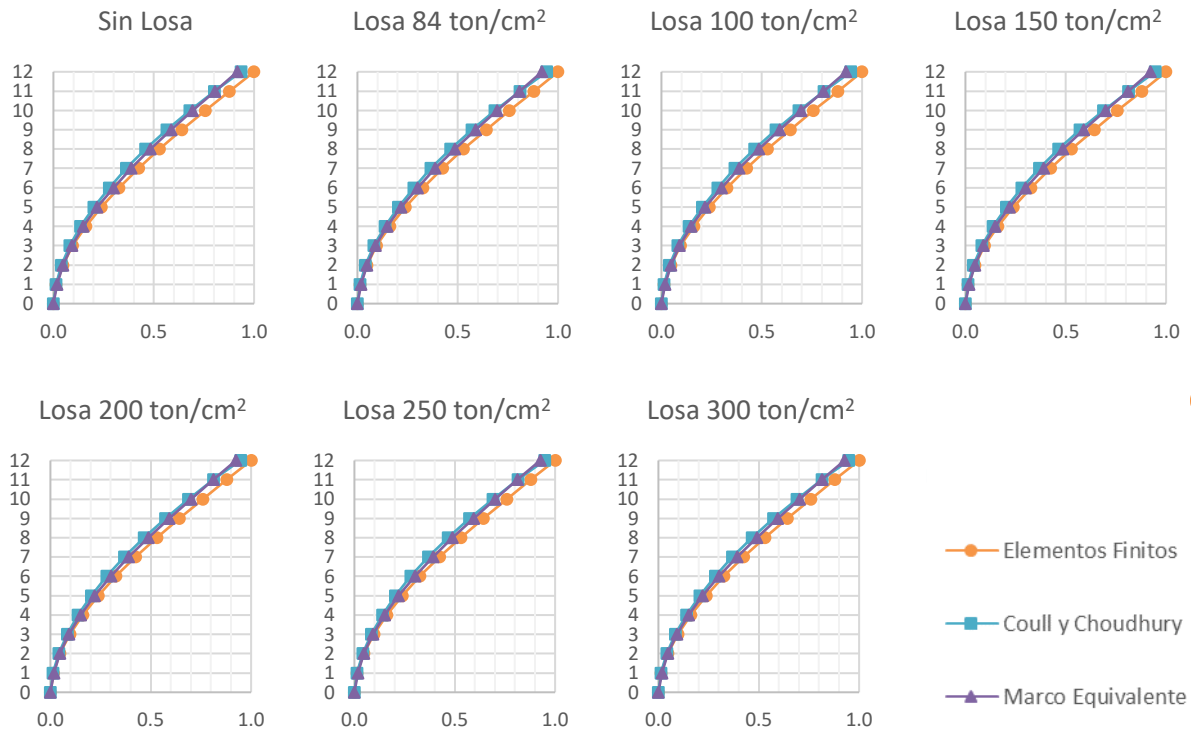
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

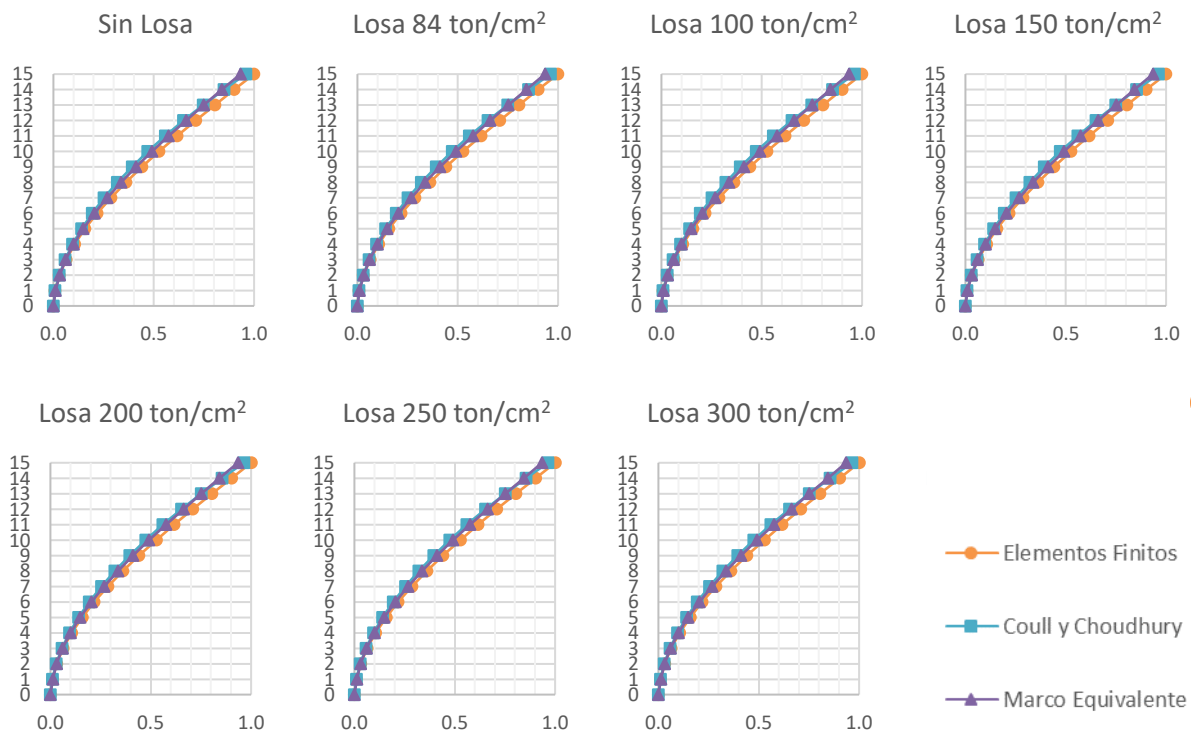


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

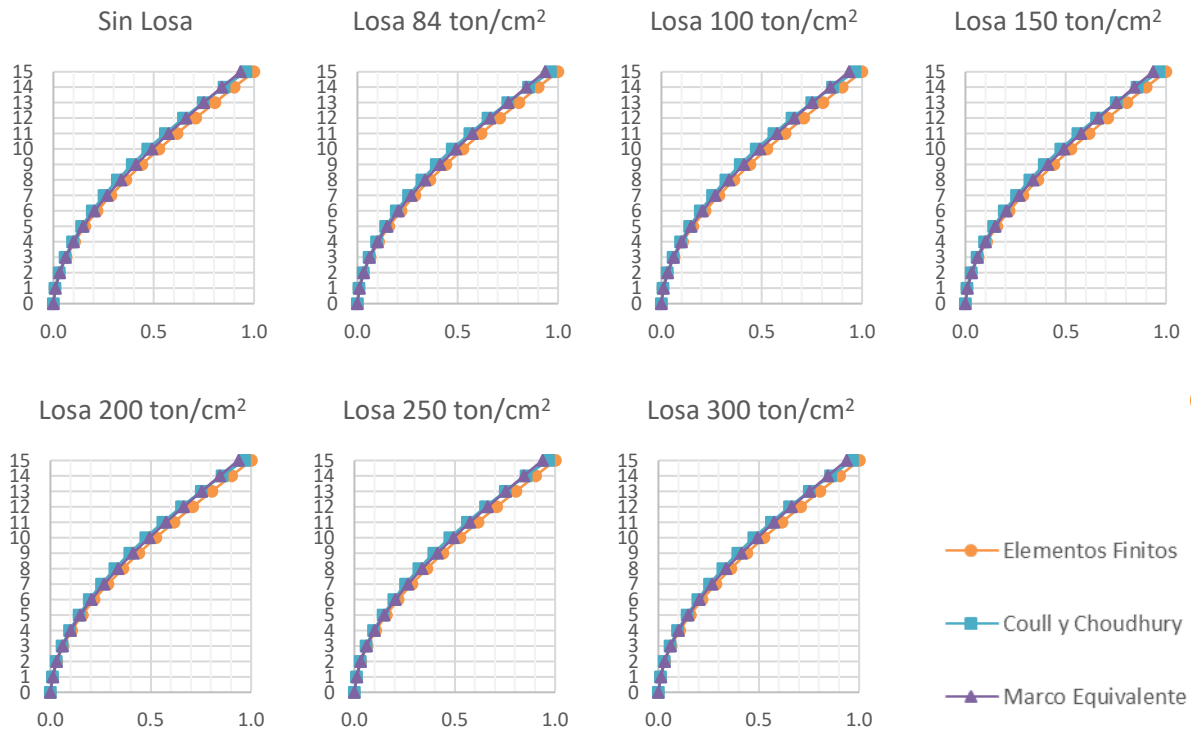


E.2.1.5. *Muros de 15 niveles*

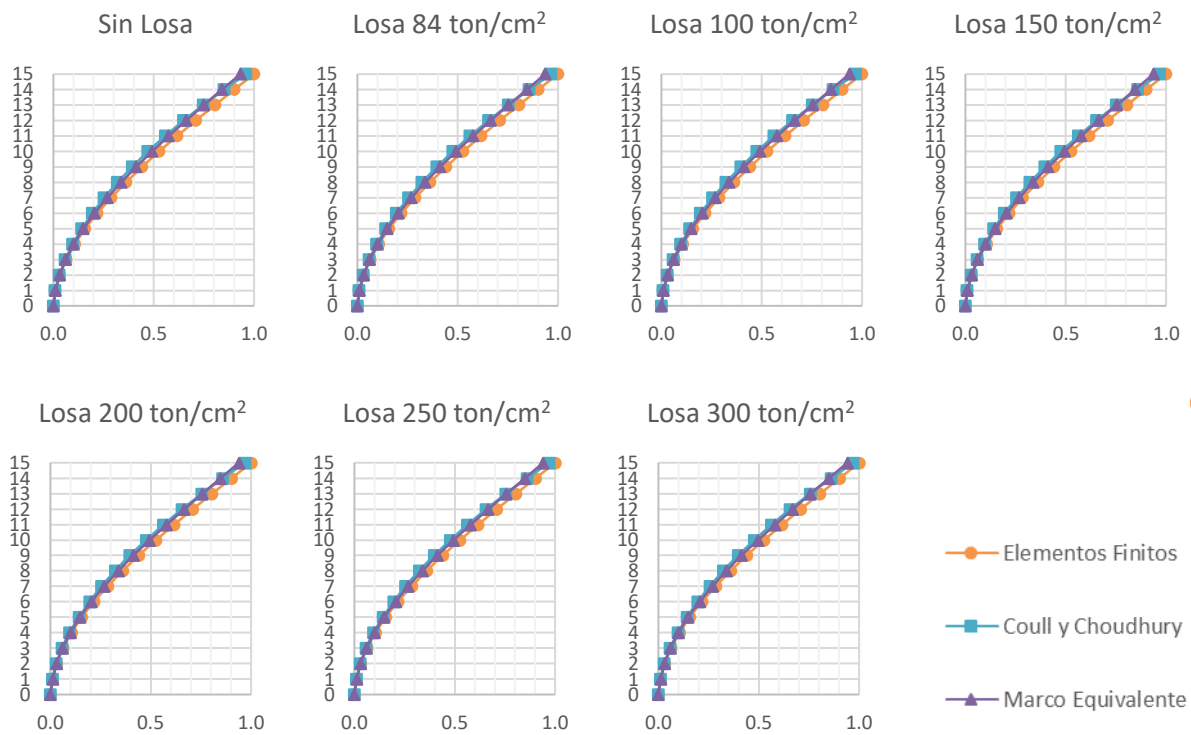
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

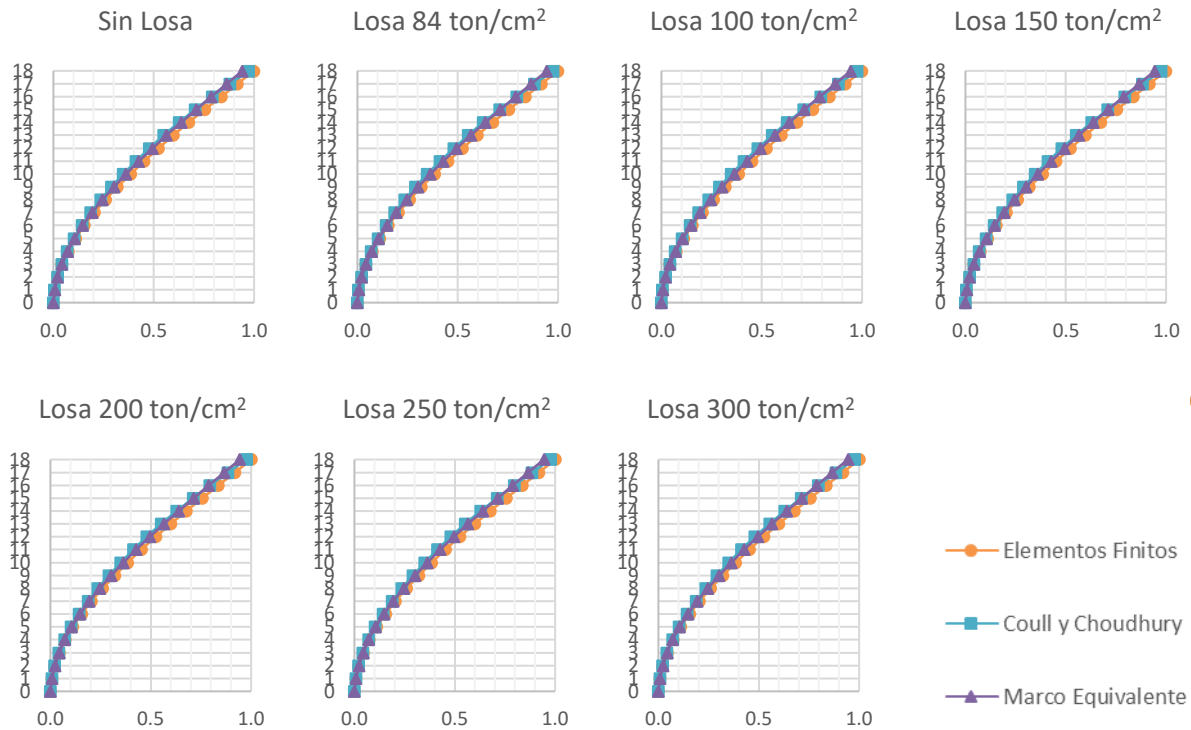


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

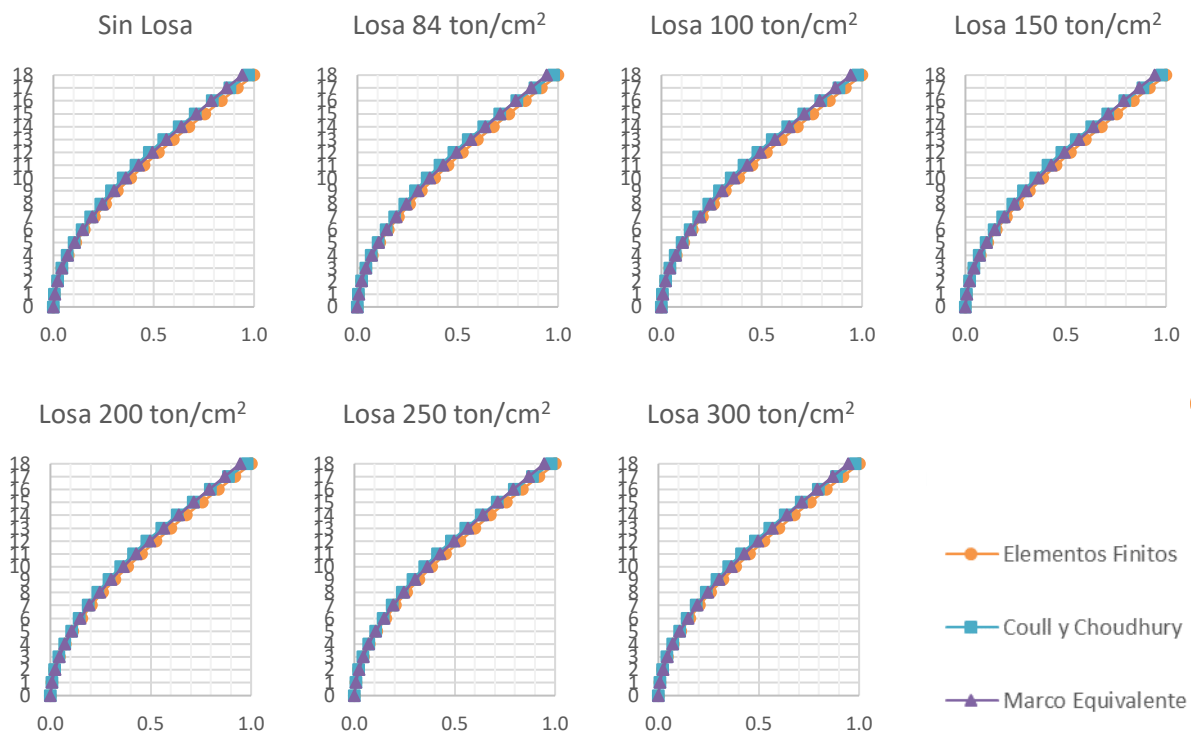


E.2.1.6. Muros de 18 niveles

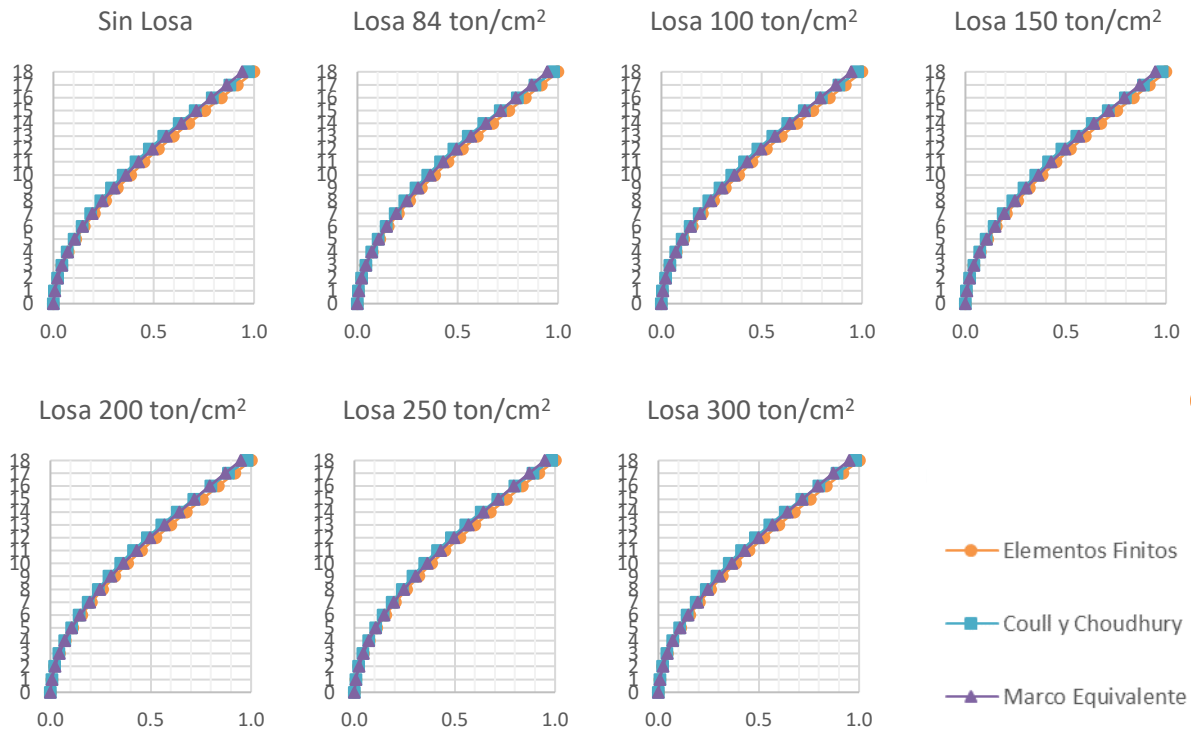
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$



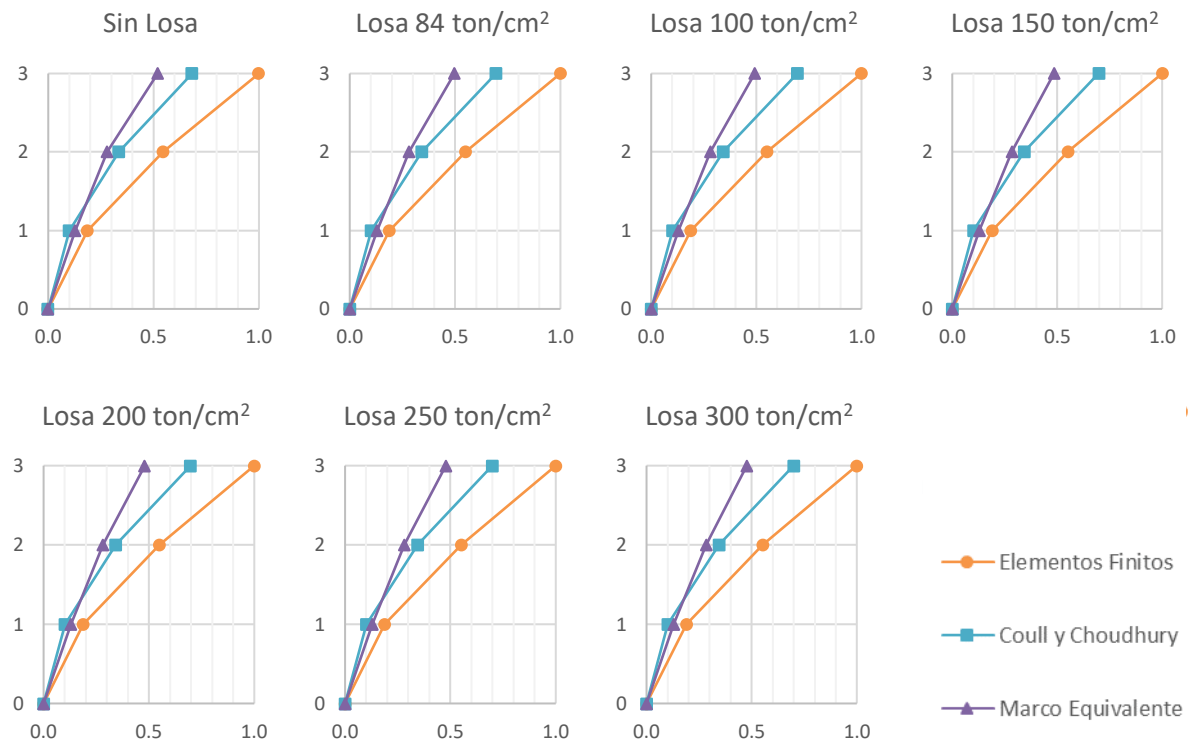
Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$



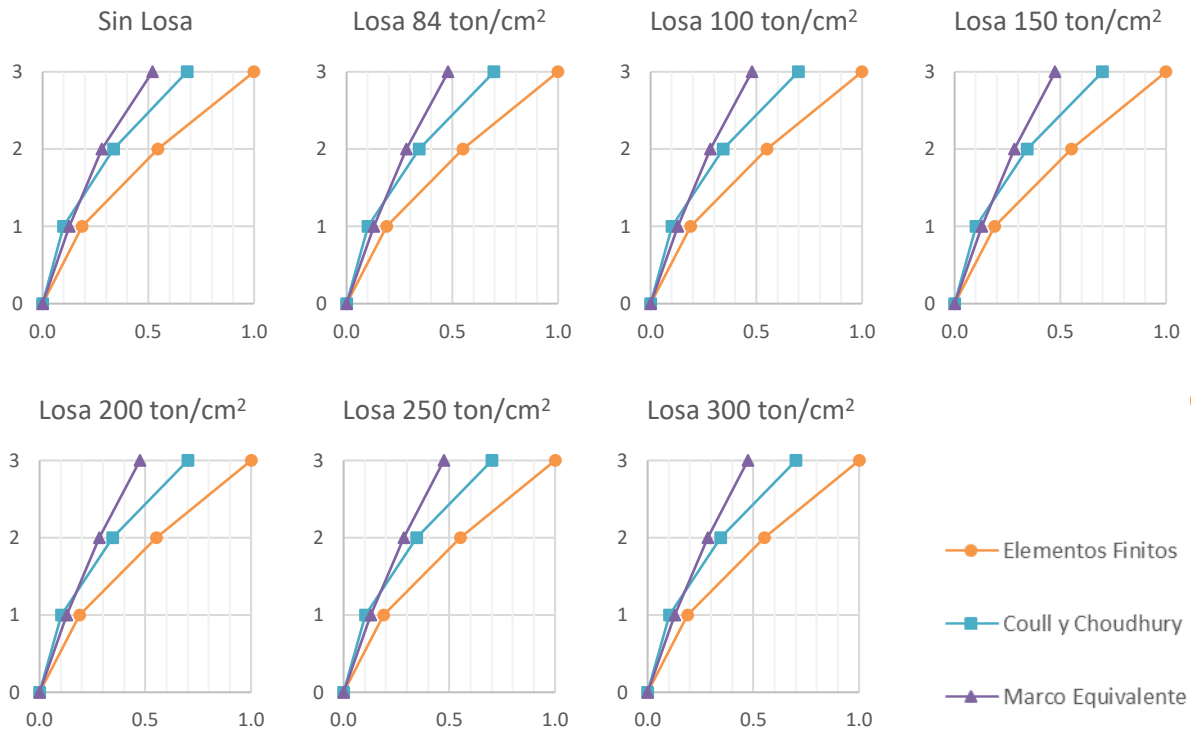
E.2.2. Muros con abertura excéntrica del 82%

E.2.2.1. Muros de tres niveles

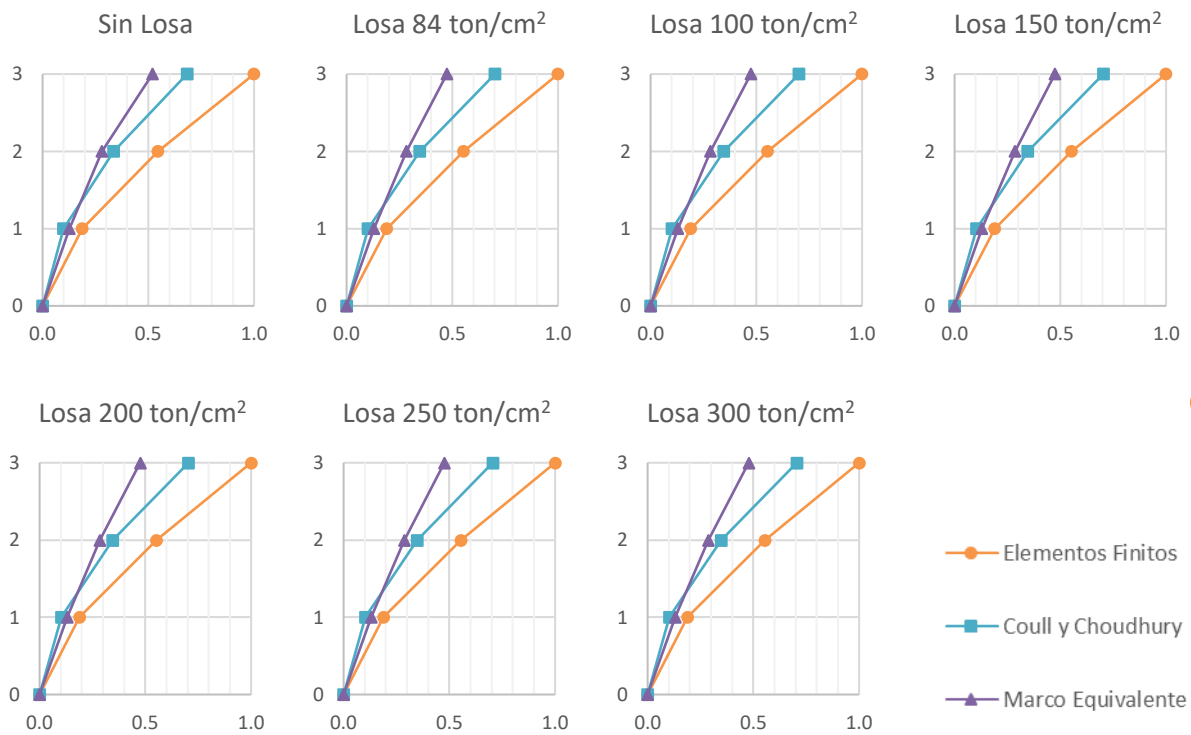
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

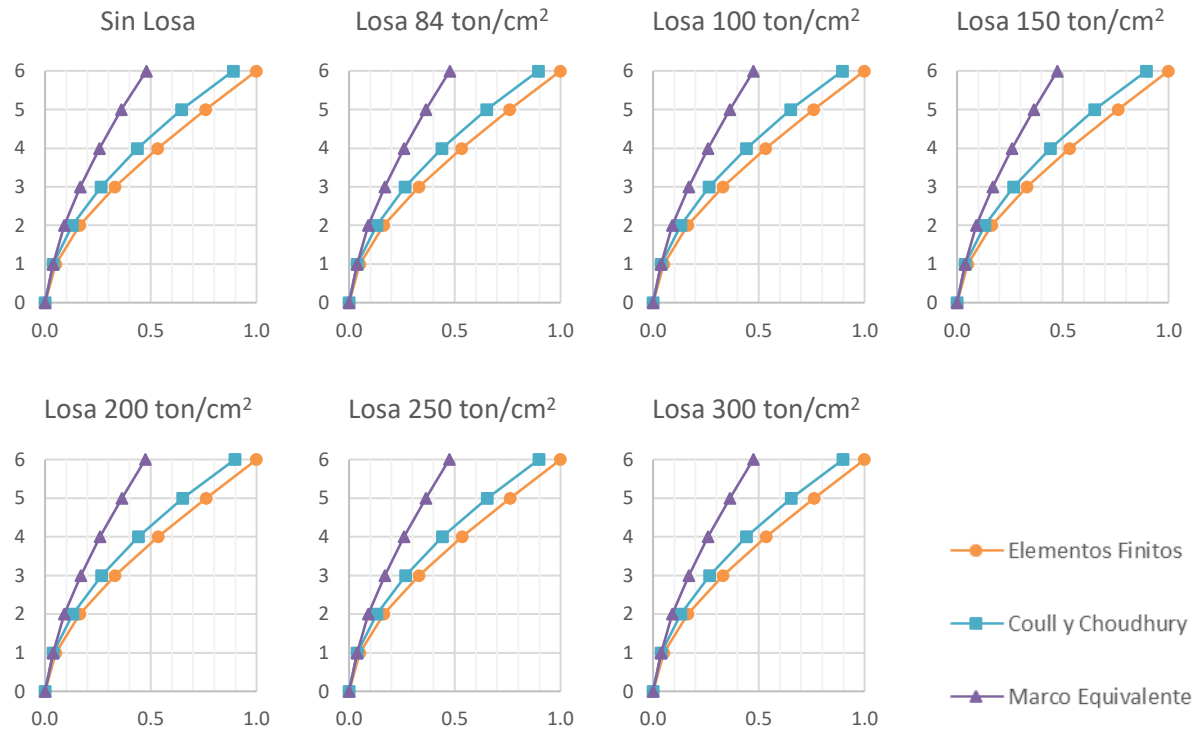


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

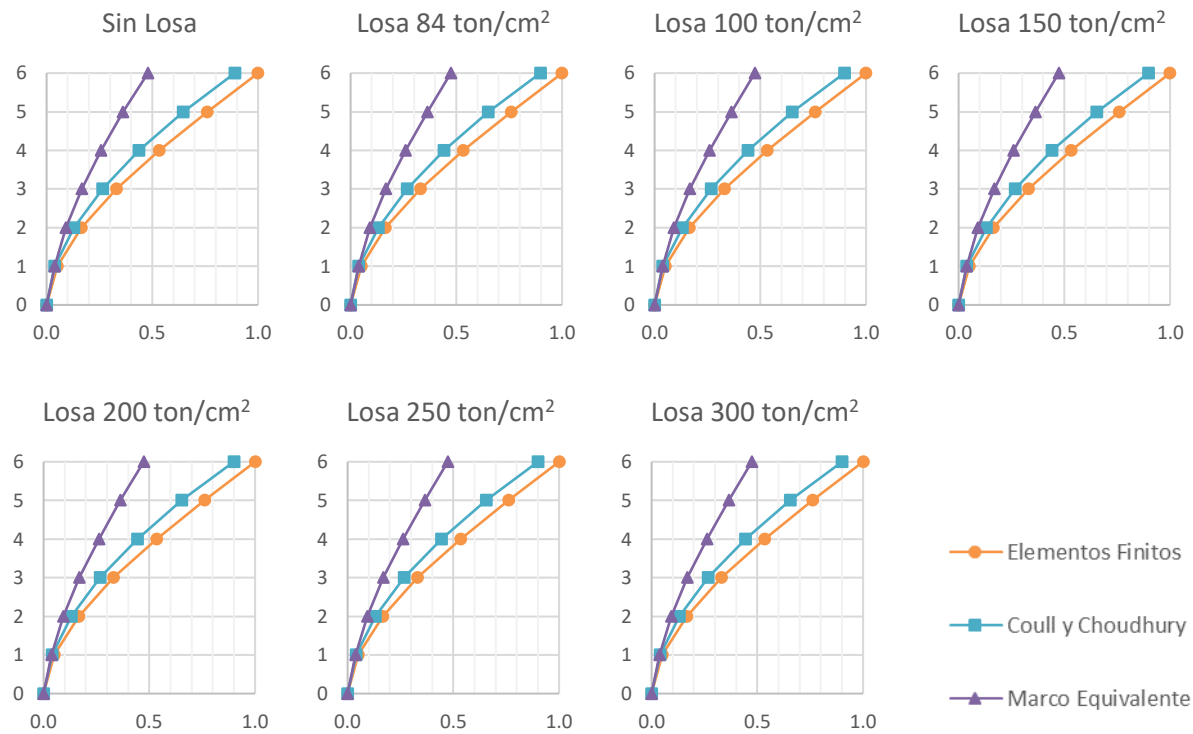


E.2.2.2. Muros de seis niveles

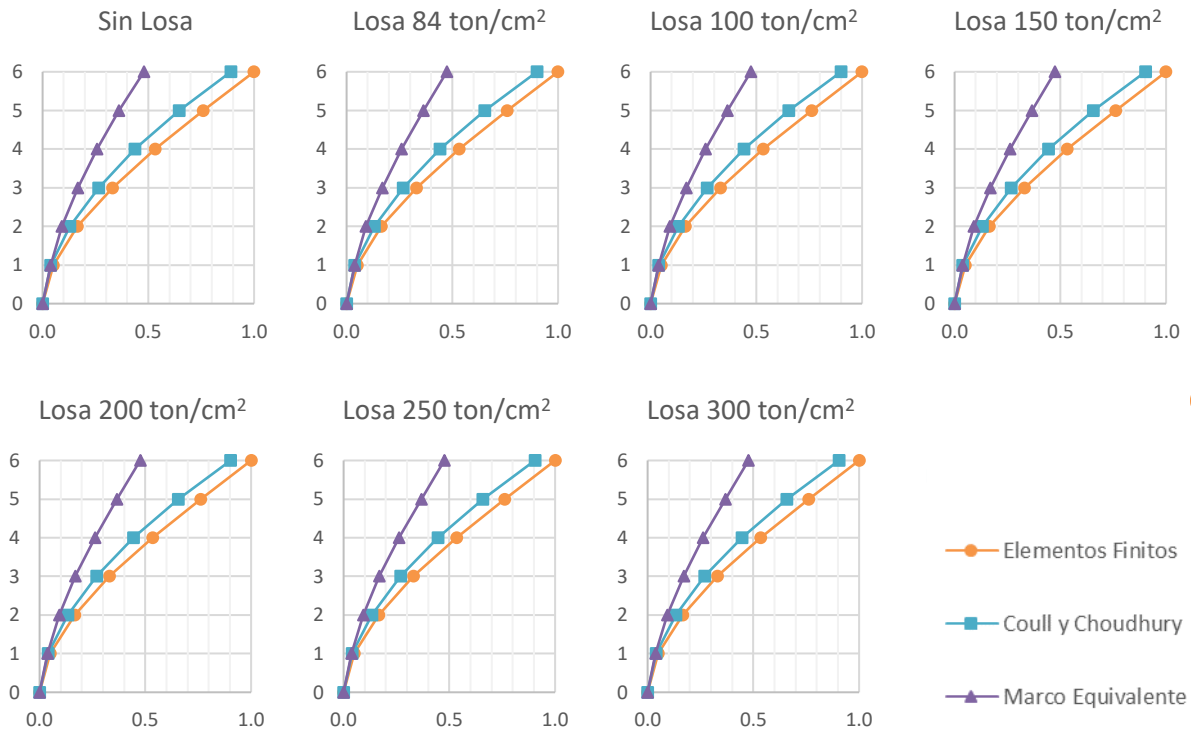
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

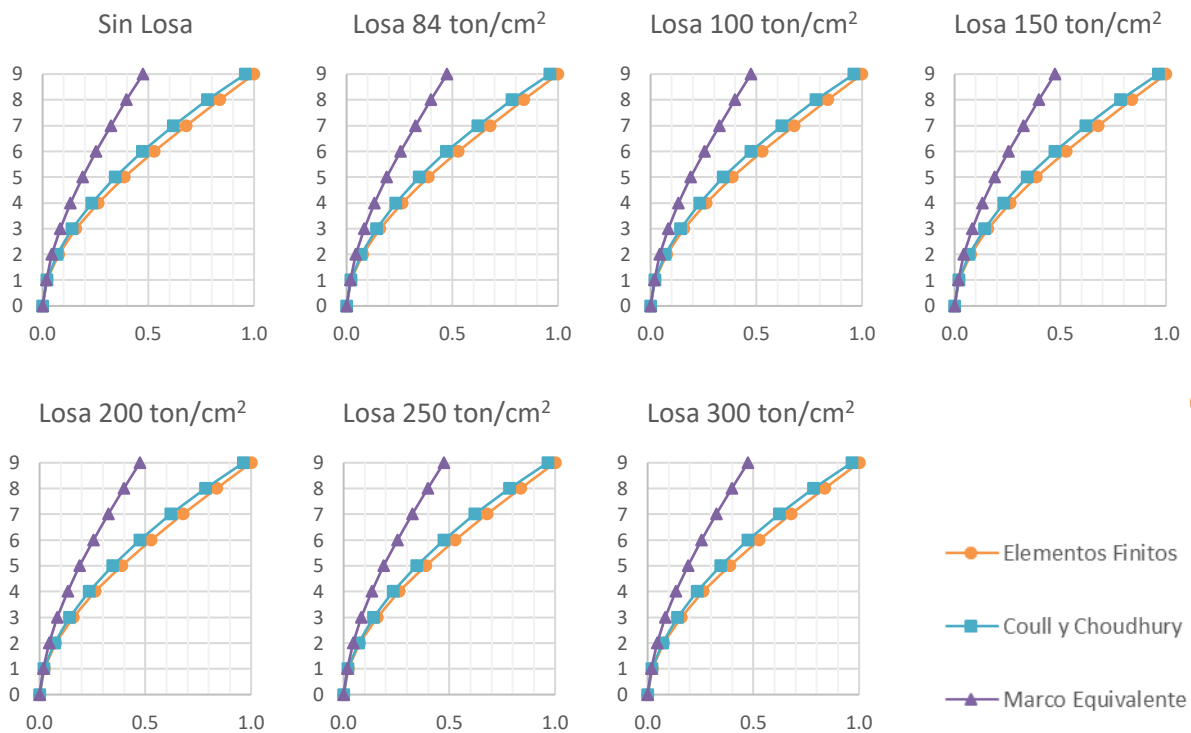


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$



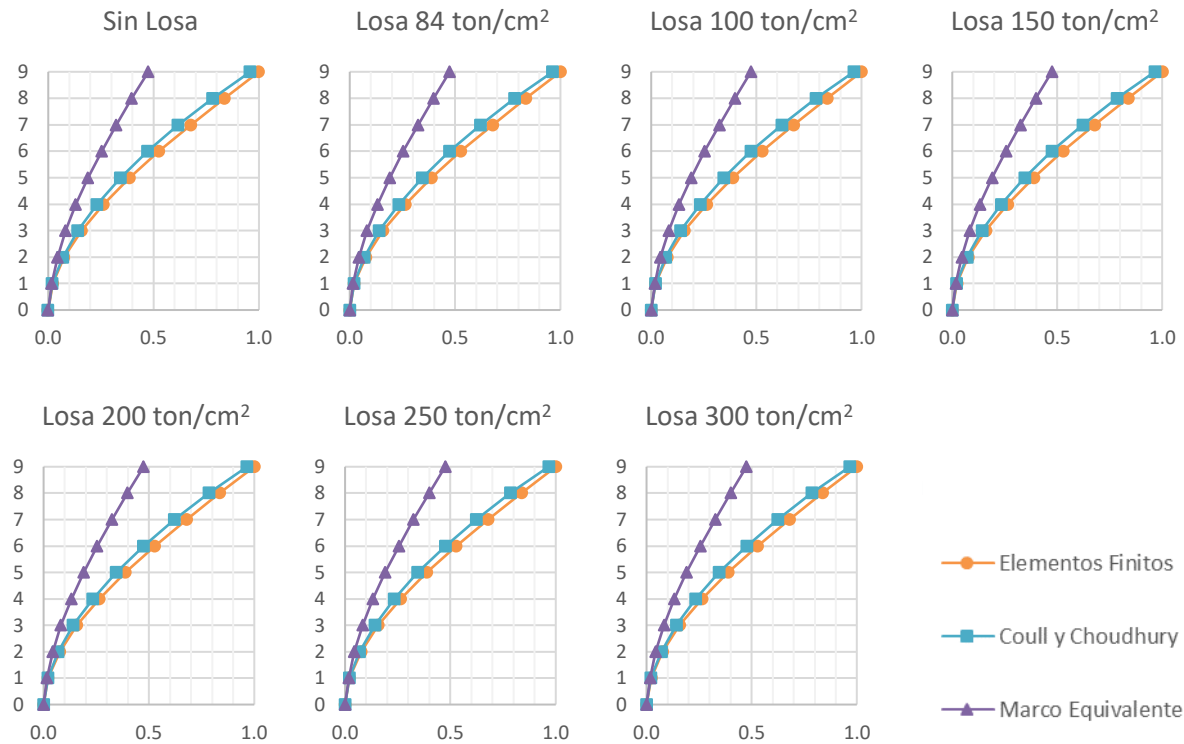
E.2.2.3. *Muros de nueve niveles*

Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$

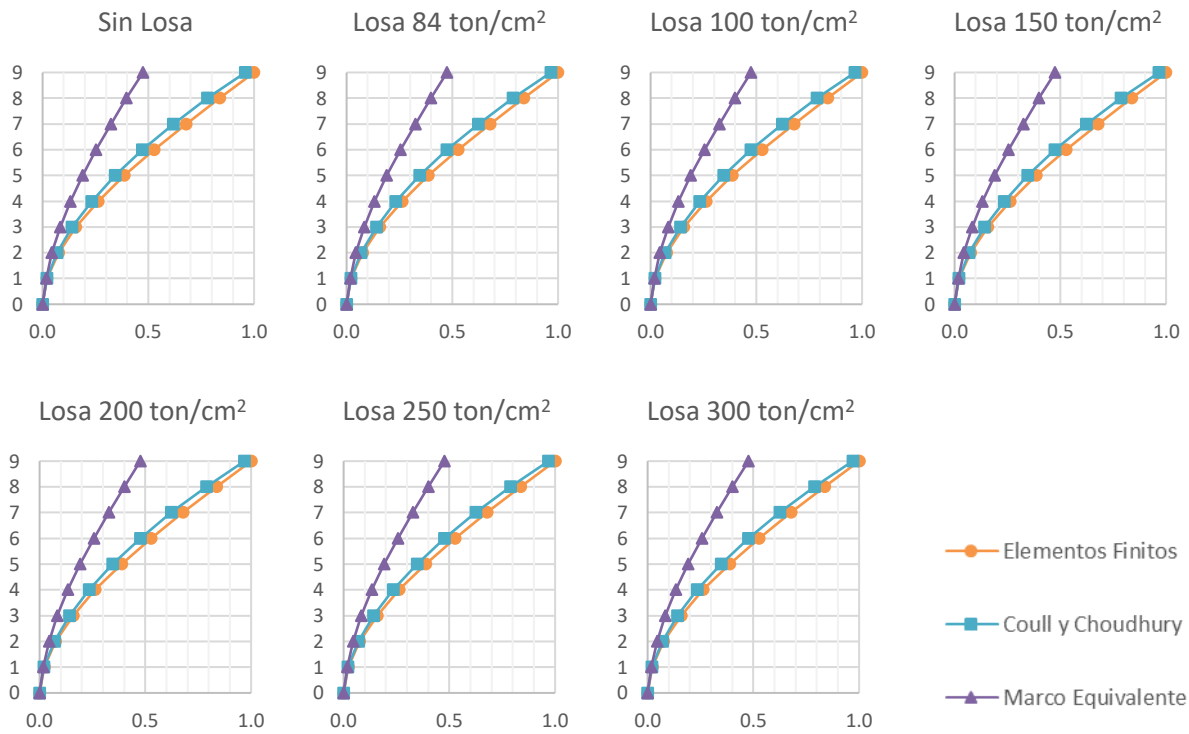




Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

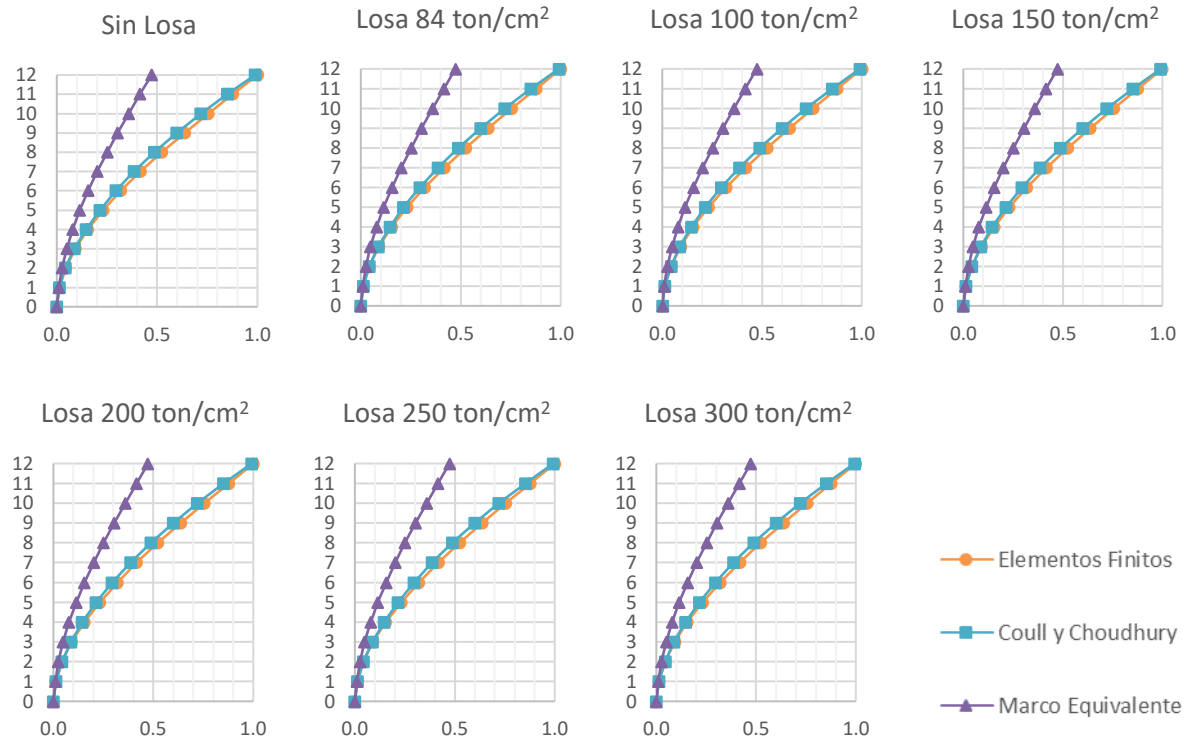


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

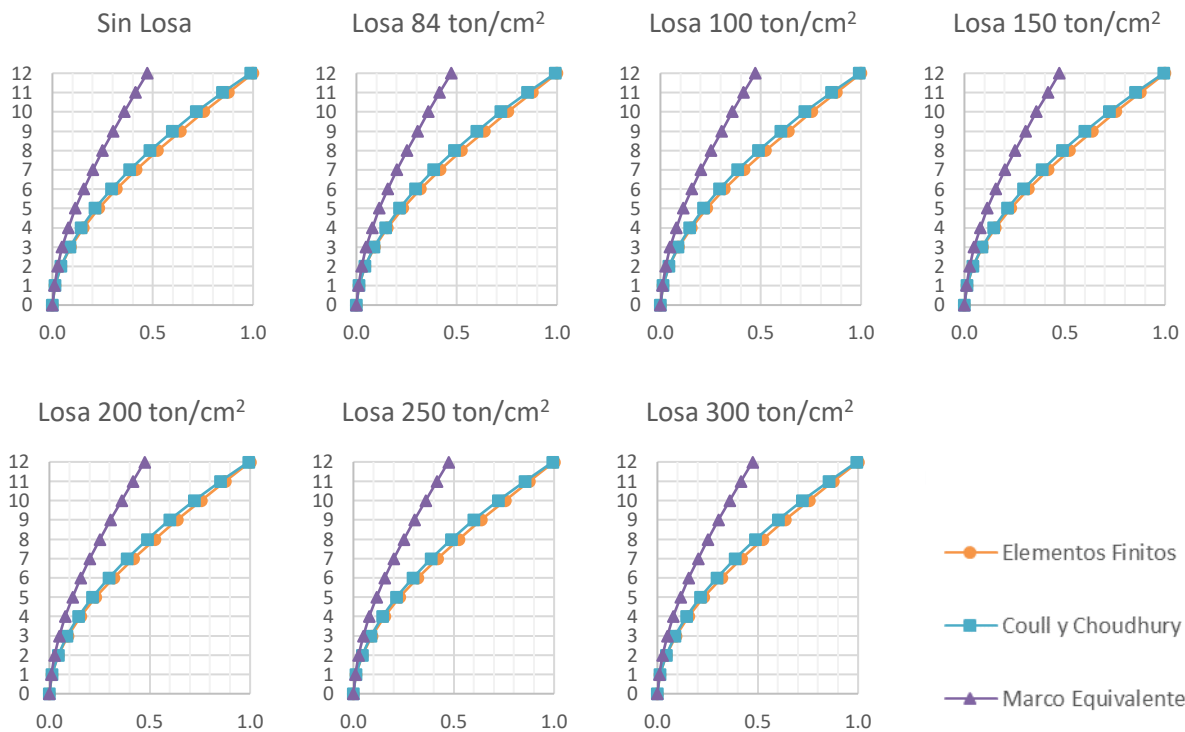


E.2.2.4. Muros de 12 niveles

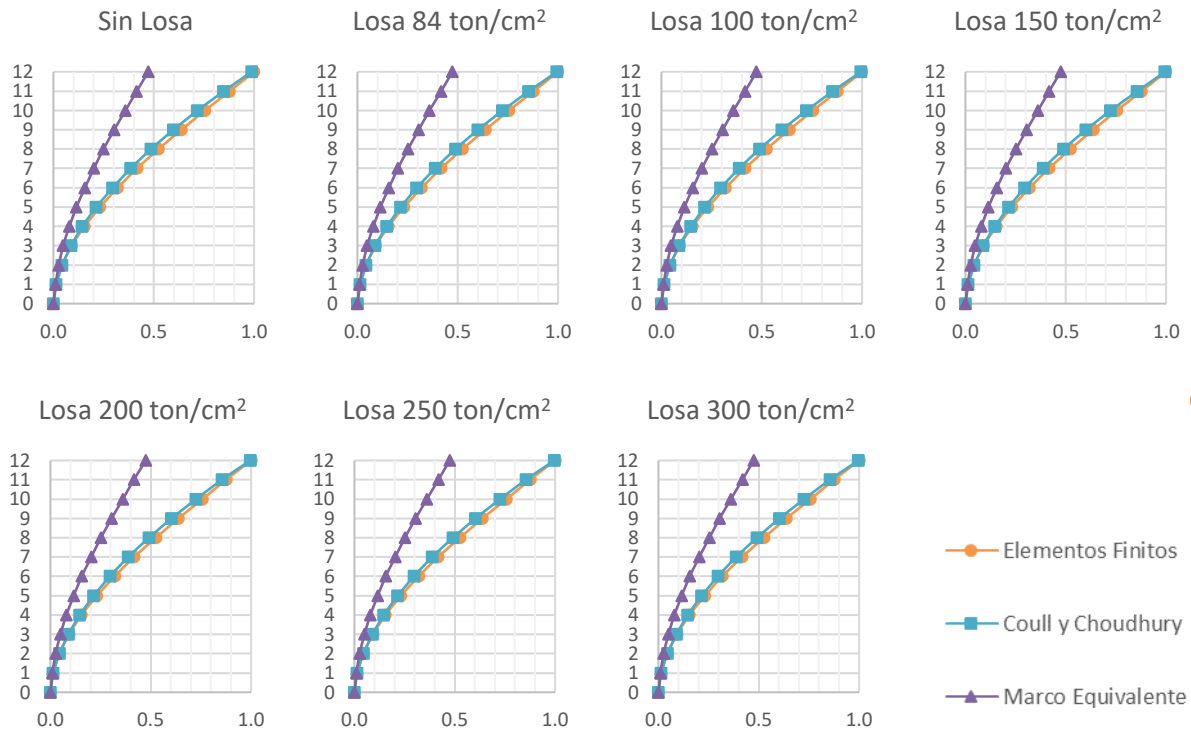
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

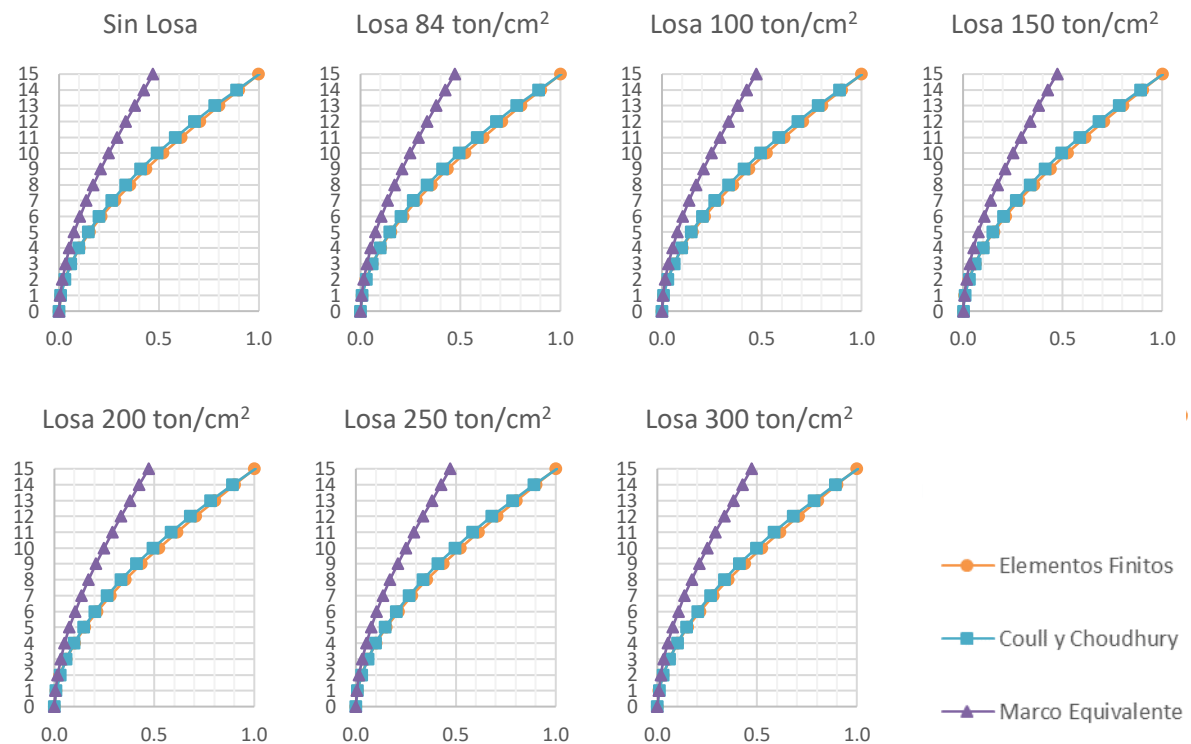


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

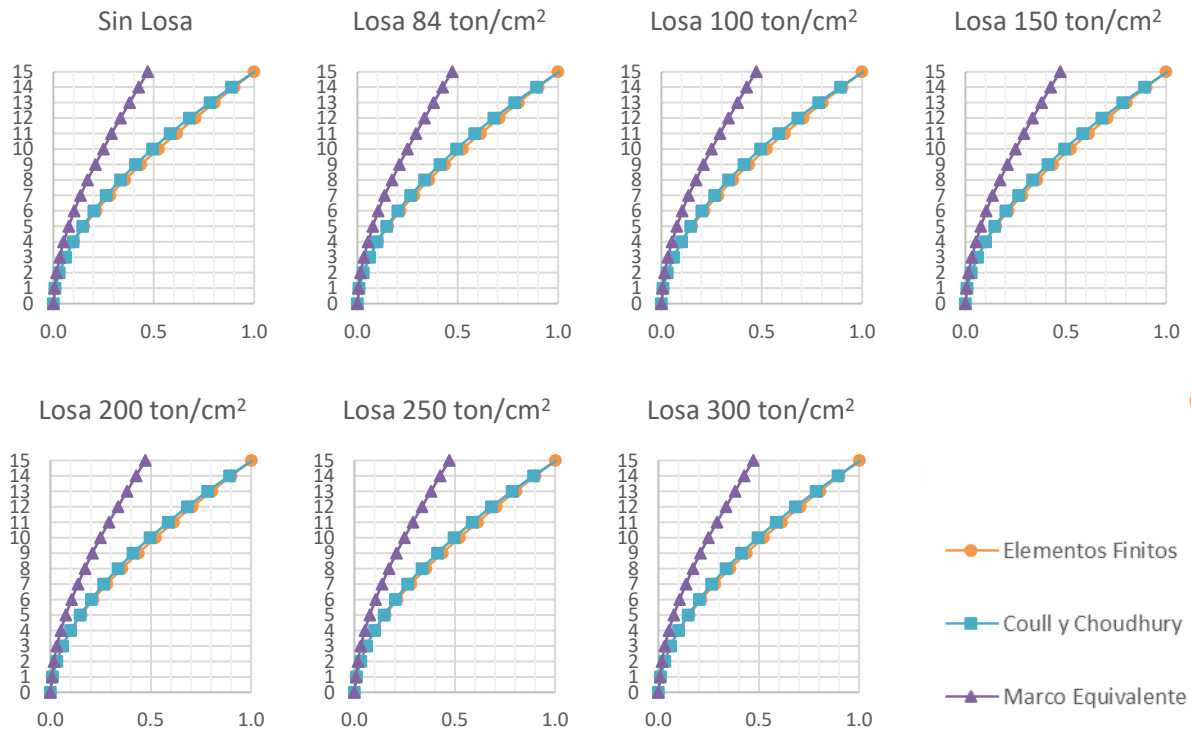


E.2.2.5. *Muros de 15 niveles*

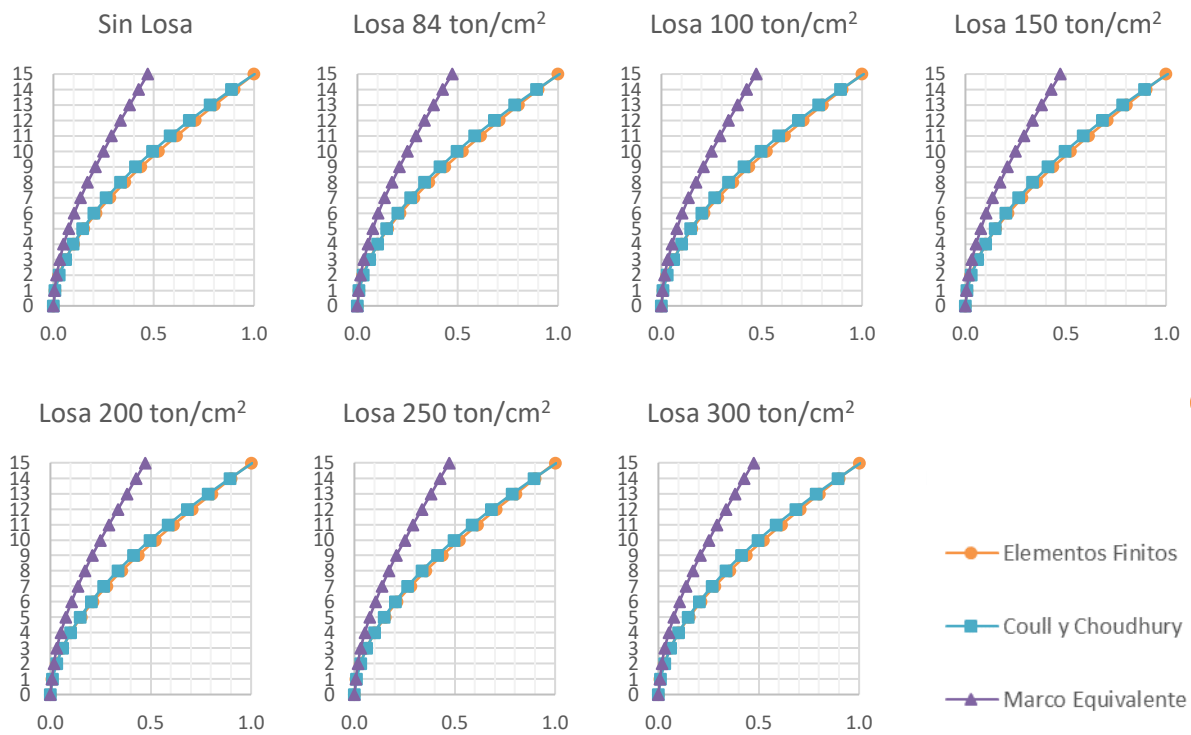
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

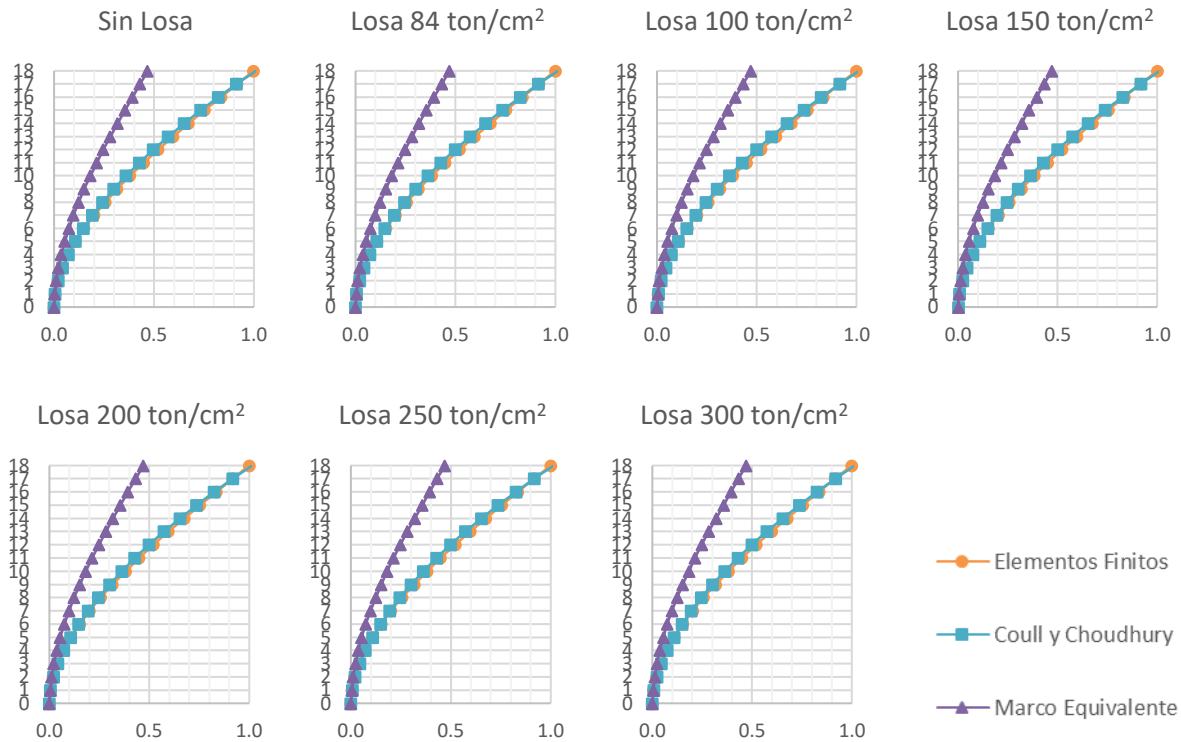


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

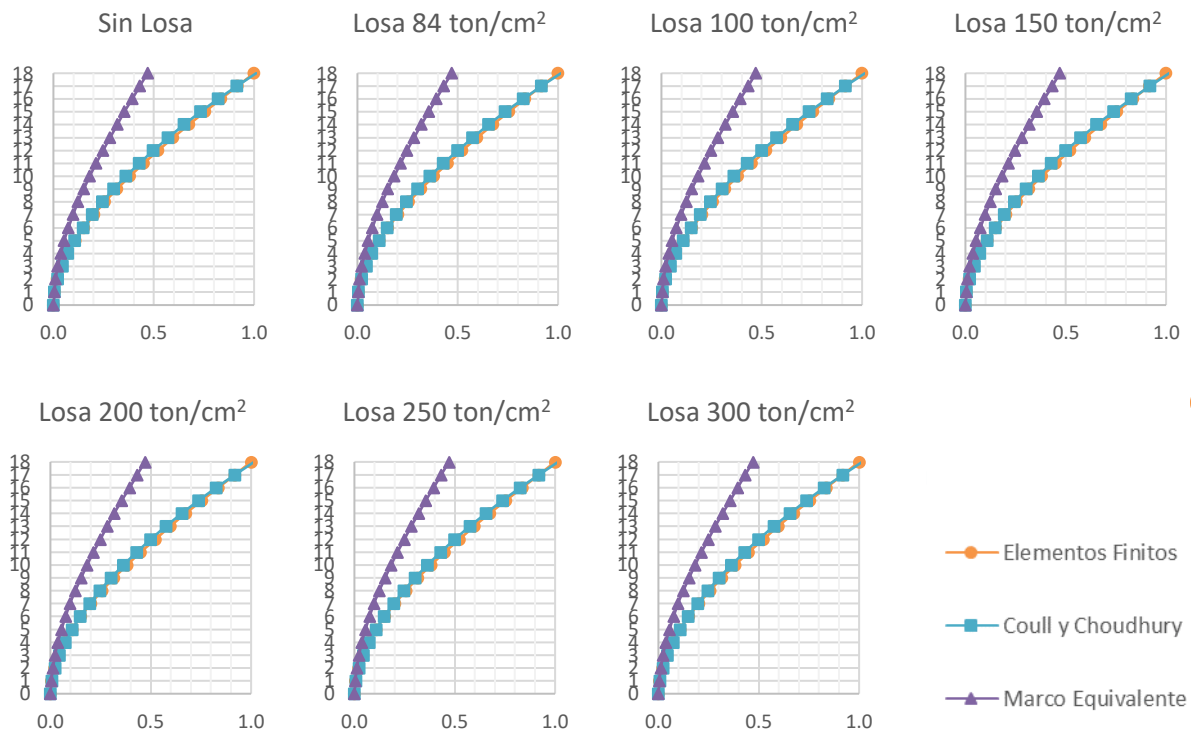


E.2.2.6. Muros de 18 niveles

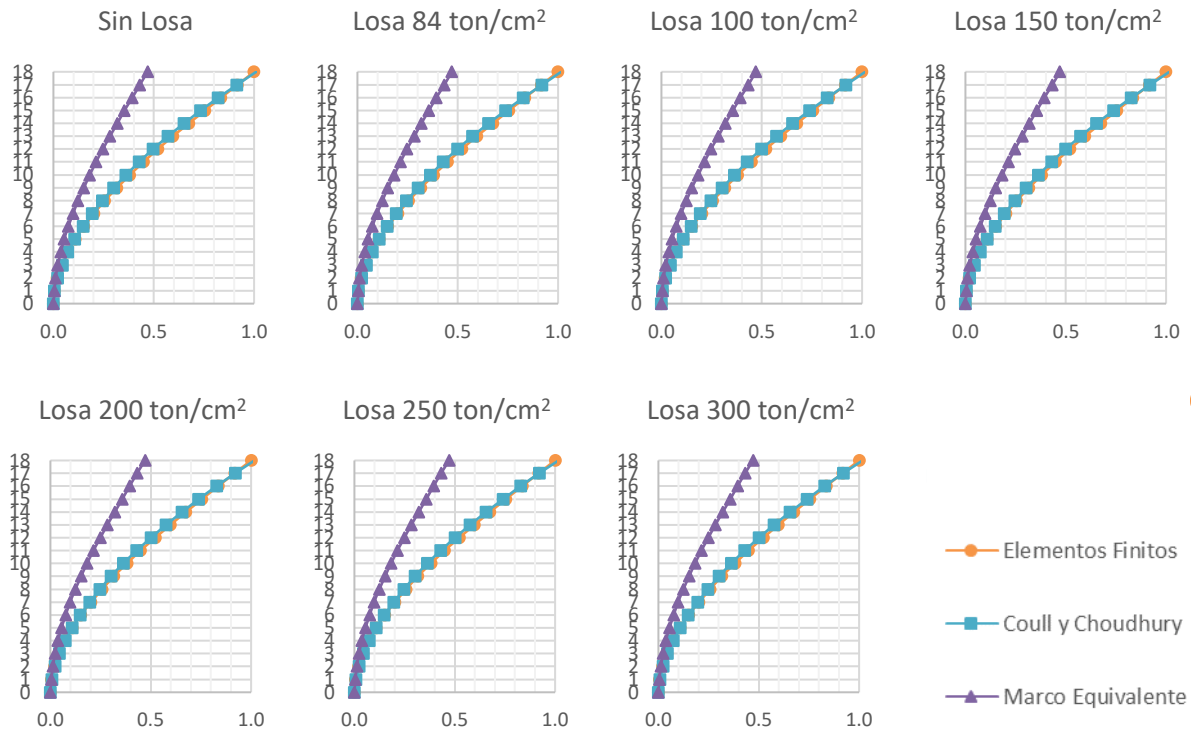
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$



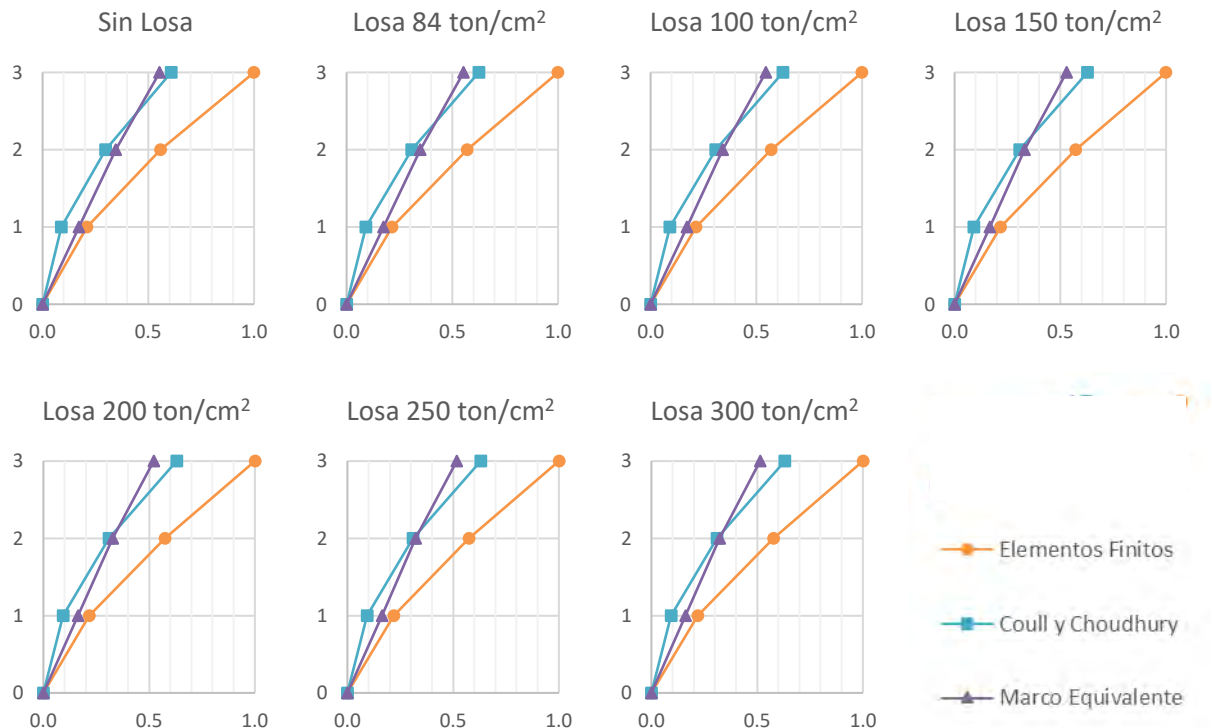
## APÉNDICE F. Curvas de resultados de muros con múltiples aberturas

Todas las gráficas contenidas en esta sección, al igual que en el *CAPÍTULO 3*, muestran las curvas Número de niveles -  $\Delta/\Delta_{azoteaFEM}$  obtenidas en este trabajo.

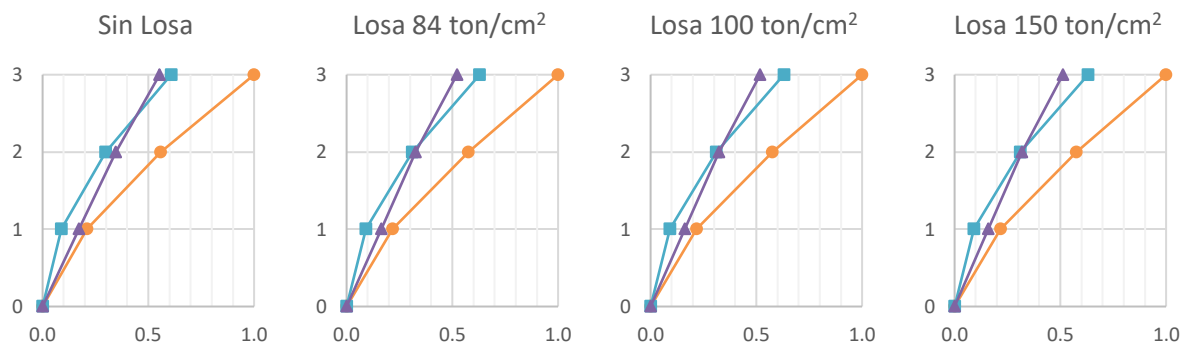
### F.1. Simétricos RM1

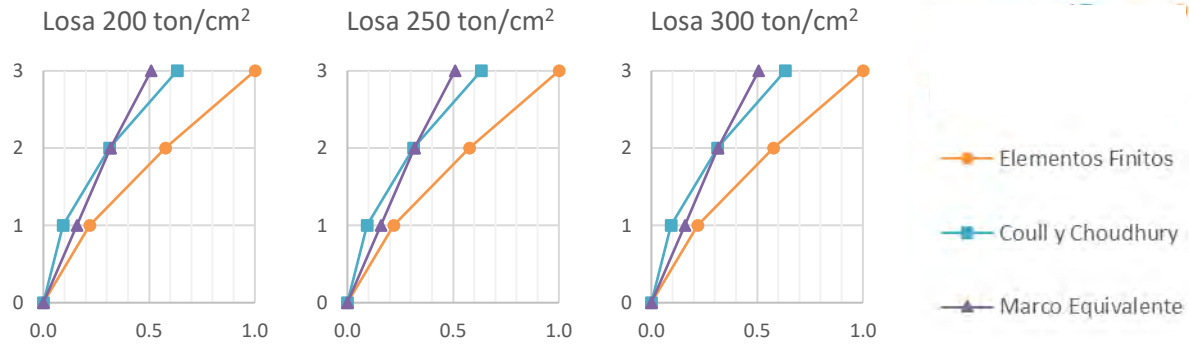
#### F.1.1. Muros de tres niveles

##### Mampostería con $E = 84 \text{ ton/cm}^2$

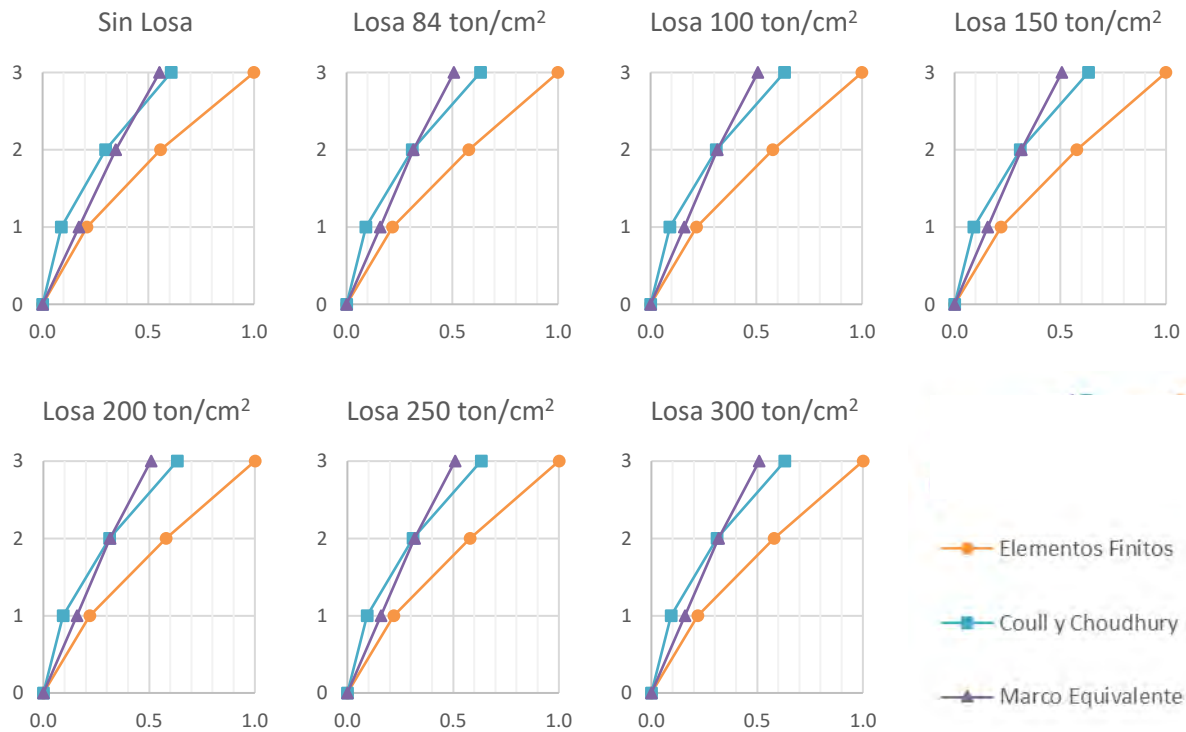


##### Mampostería con $E = 36 \text{ ton/cm}^2$



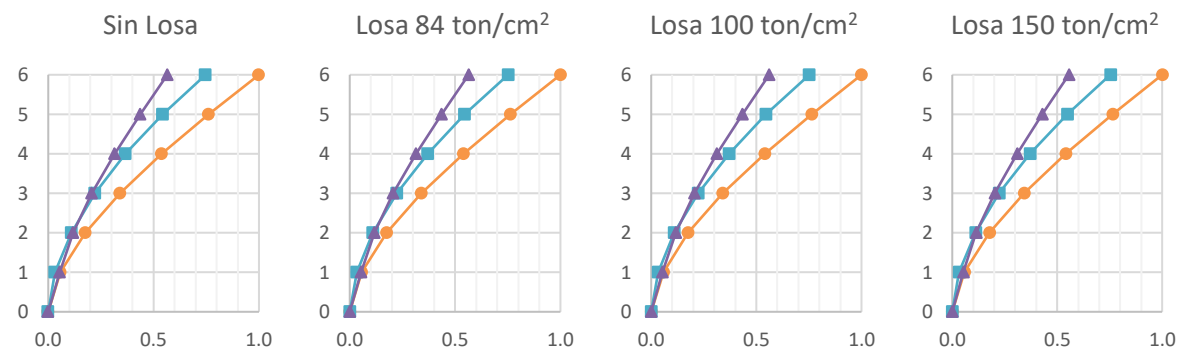


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$



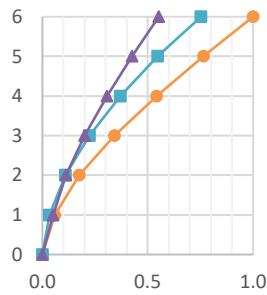
F.1.2. Muros de seis niveles

Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$

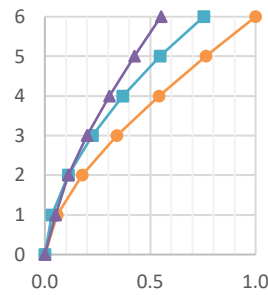




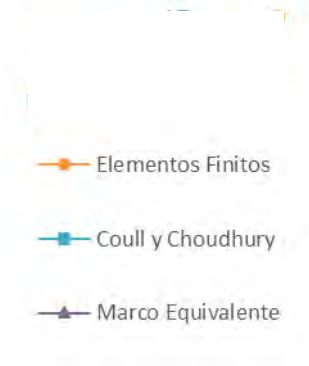
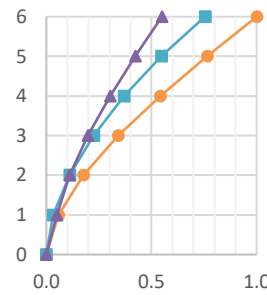
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>

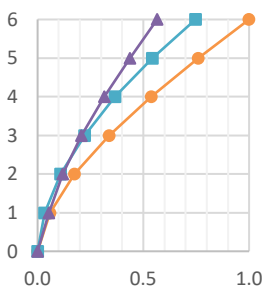


Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>

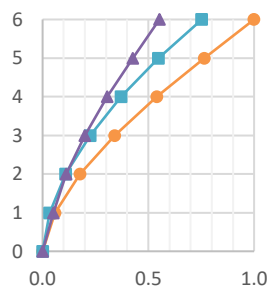


Mampostería con E = 36 ton/cm<sup>2</sup>

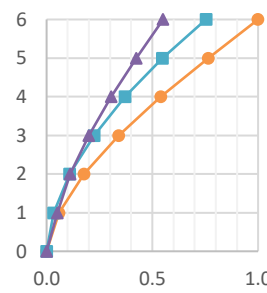
Sin Losa



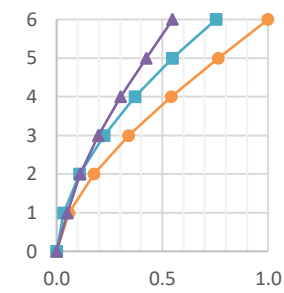
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



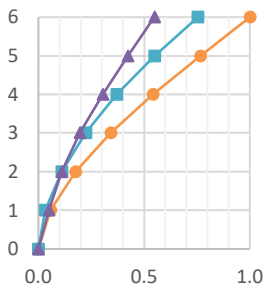
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



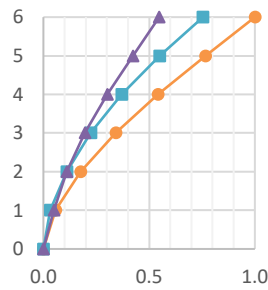
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



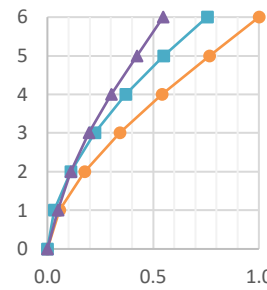
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>

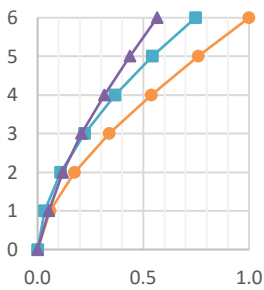


Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>

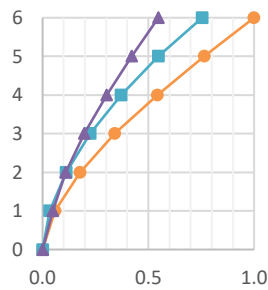


Mampostería con E = 12 ton/cm<sup>2</sup>

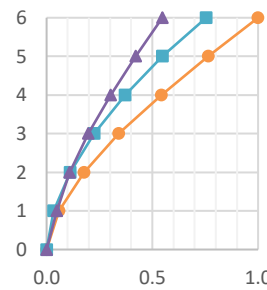
Sin Losa



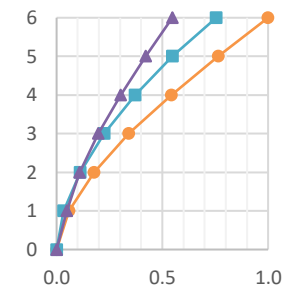
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



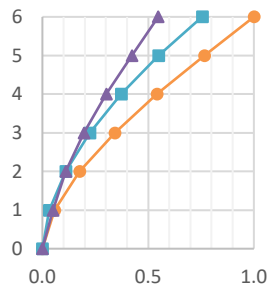
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



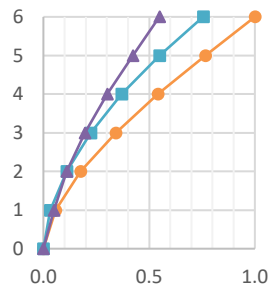
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



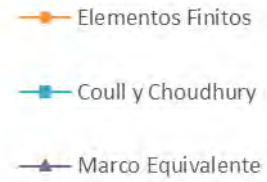
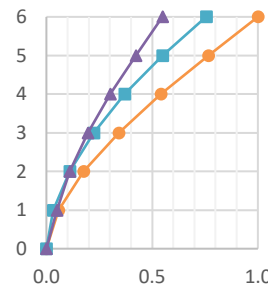
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>



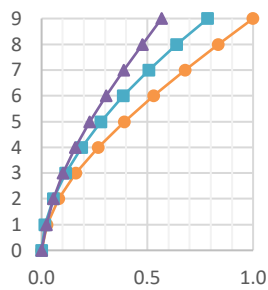
Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>



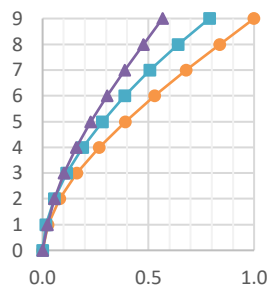
### F.1.3. Muros de nueve niveles

#### Mampostería con $E = 84 \text{ ton/cm}^2$

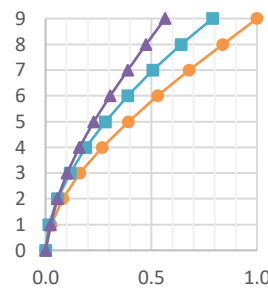
Sin Losa



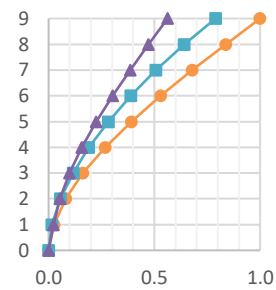
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



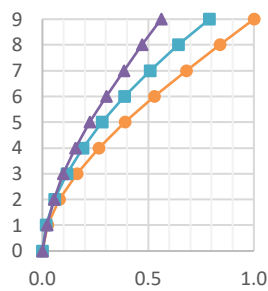
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



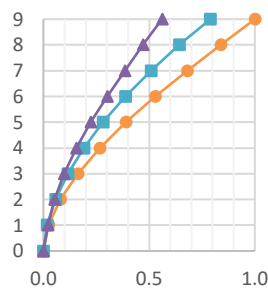
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



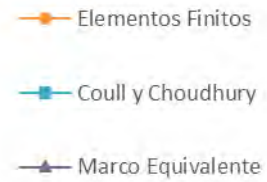
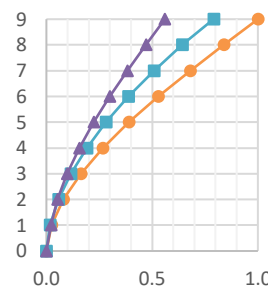
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>

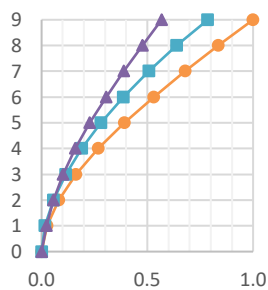


Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>

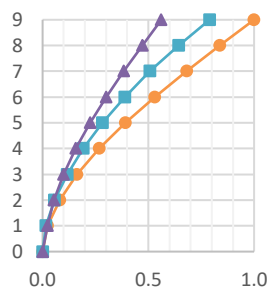


#### Mampostería con $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

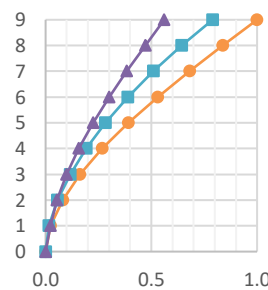
Sin Losa



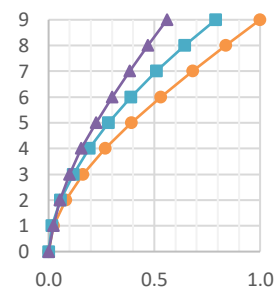
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



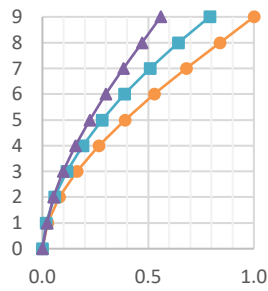
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



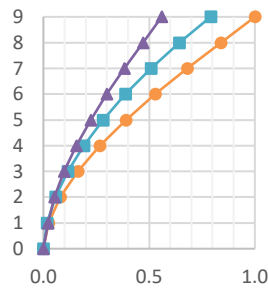
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



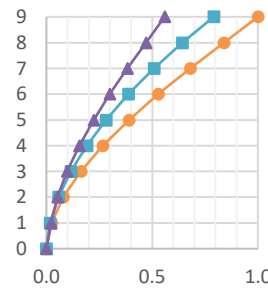
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>

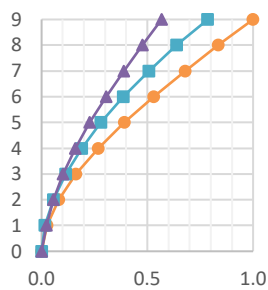


Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>

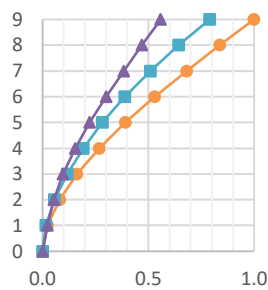


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

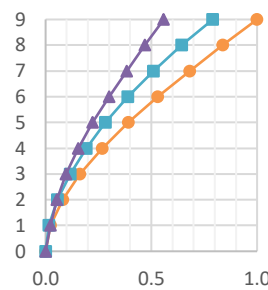
Sin Losa



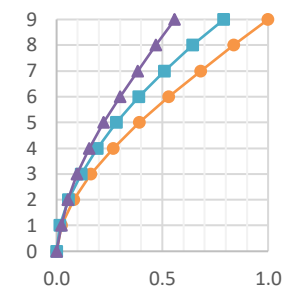
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



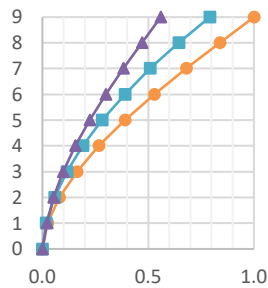
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



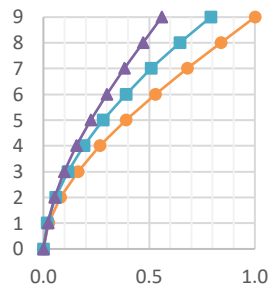
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



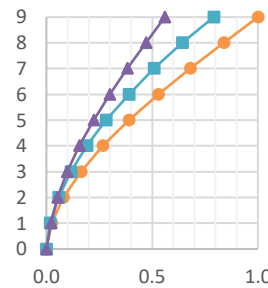
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>



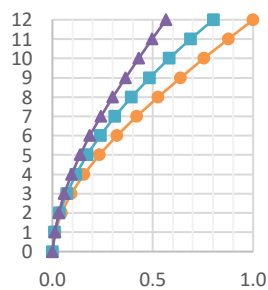
Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>



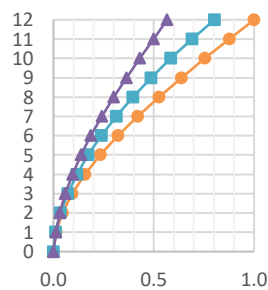
*F.1.4. Muros de 12 niveles*

Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$

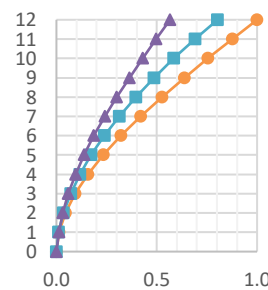
Sin Losa



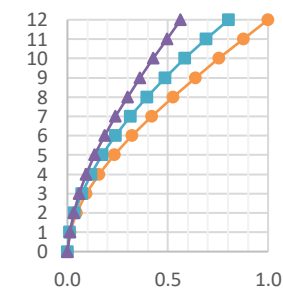
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



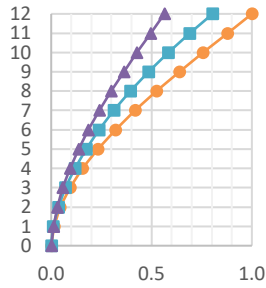
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



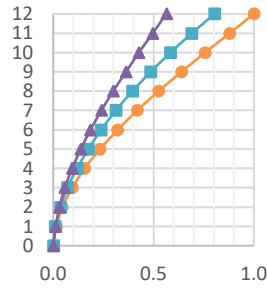
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



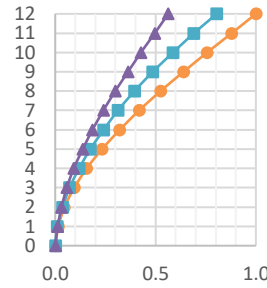
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>

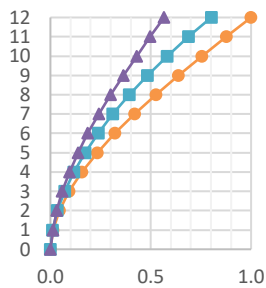


Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>

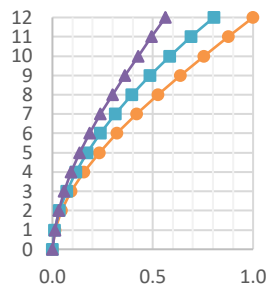


Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

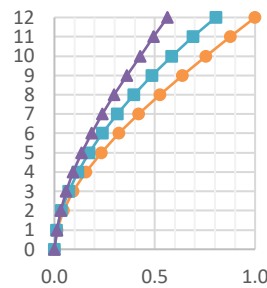
Sin Losa



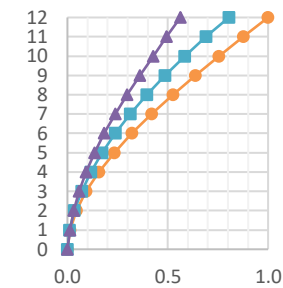
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



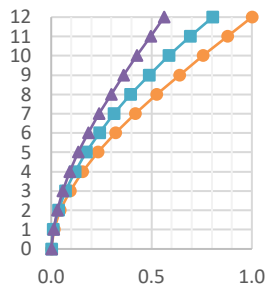
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



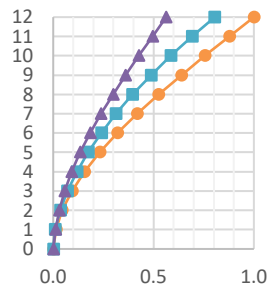
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



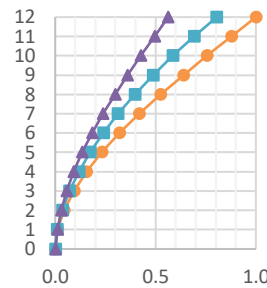
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>

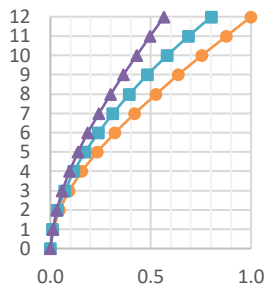


Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>

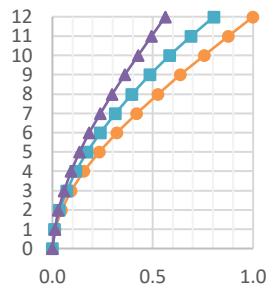


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

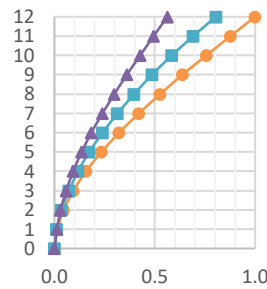
Sin Losa



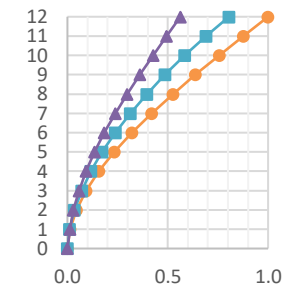
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>

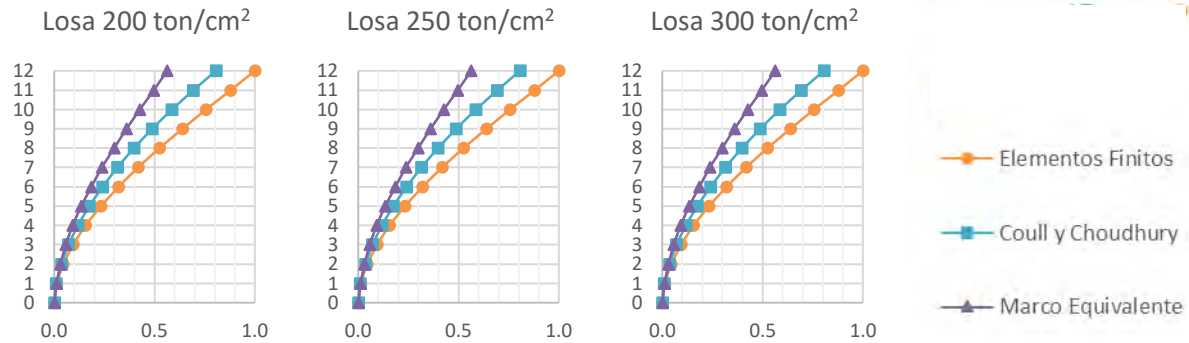


Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



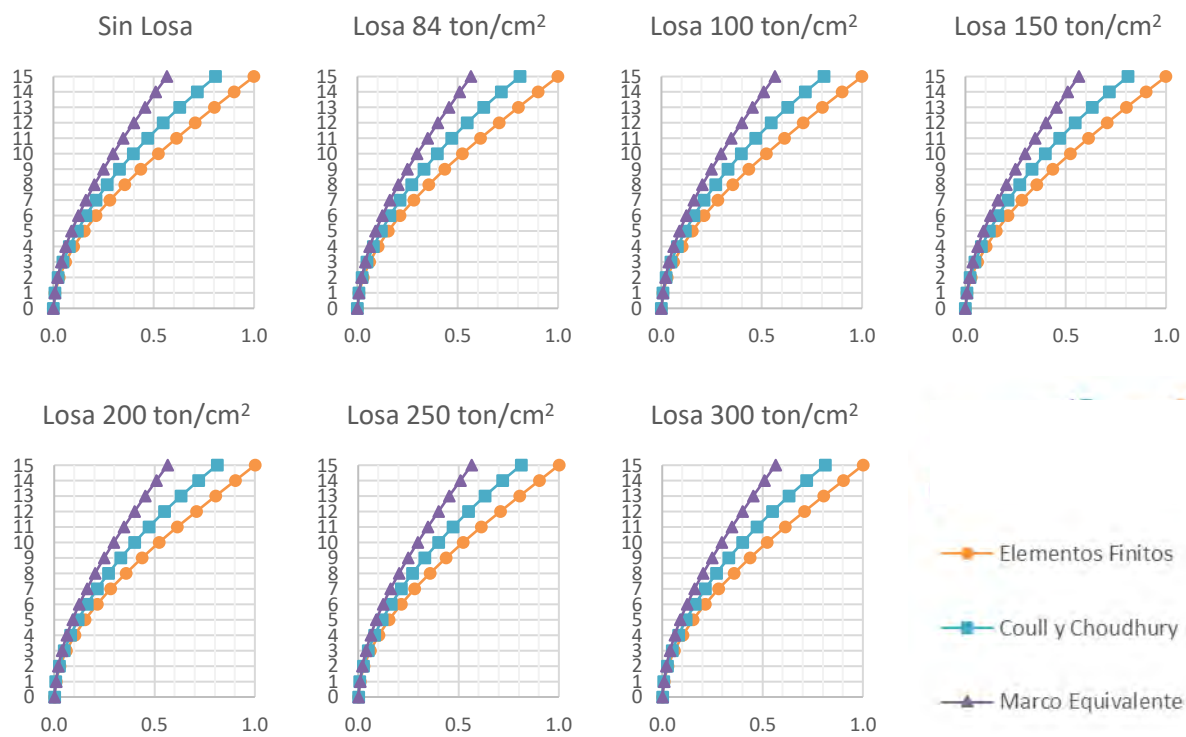
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



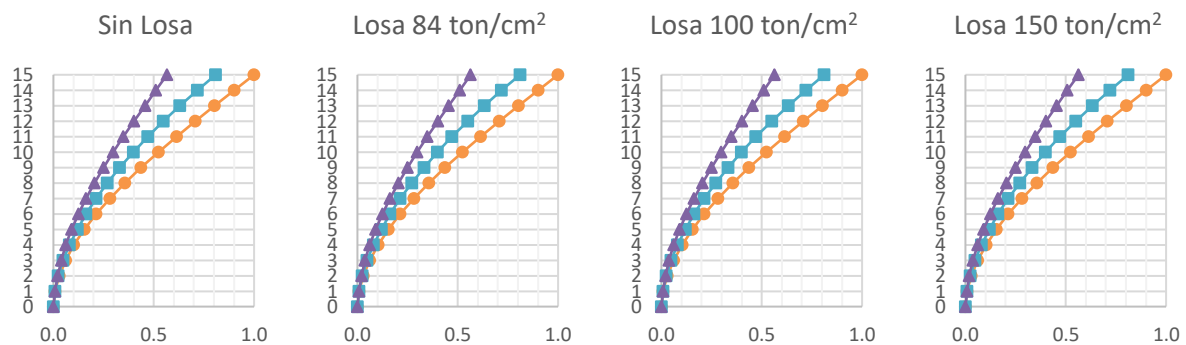


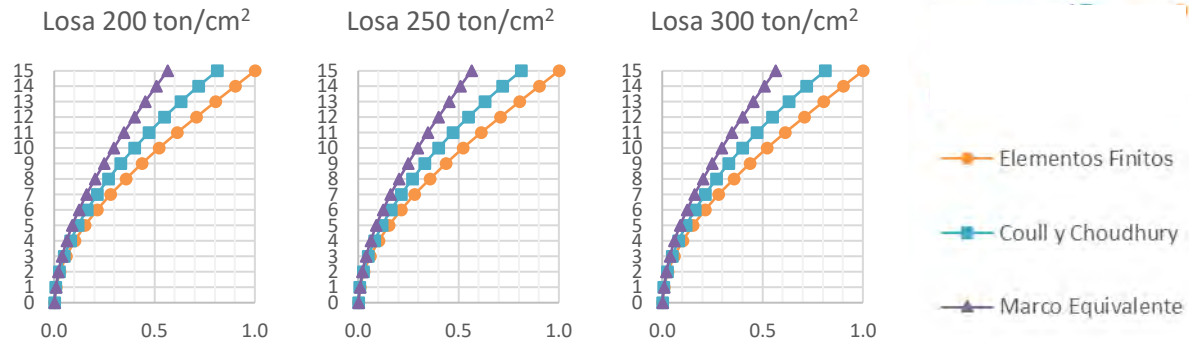
### F.1.5. Muros de 15 niveles

#### Mampostería con $E = 84 \text{ ton/cm}^2$

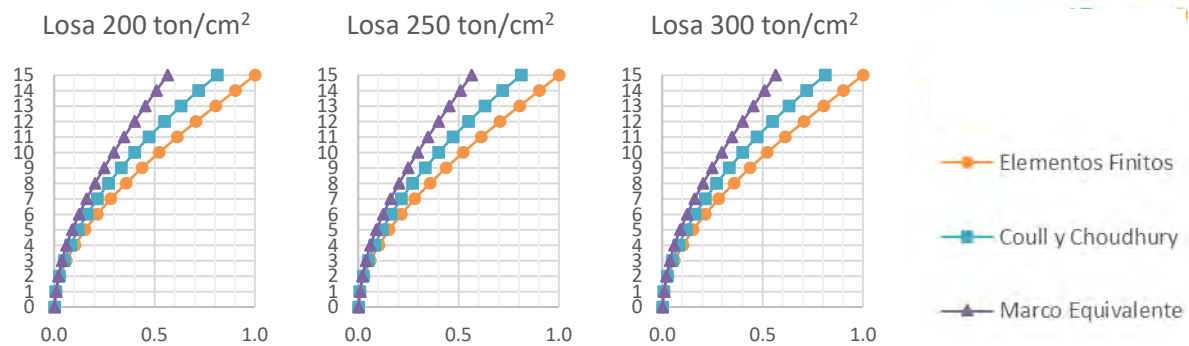
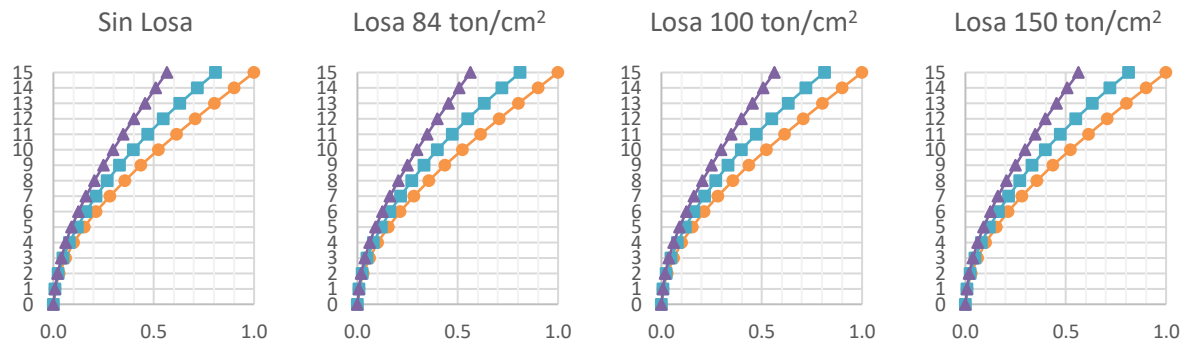


#### Mampostería con $E = 36 \text{ ton/cm}^2$



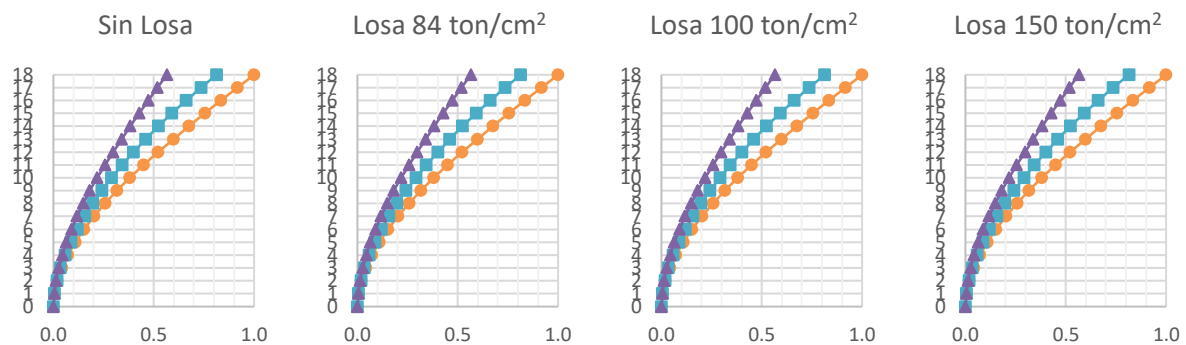


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

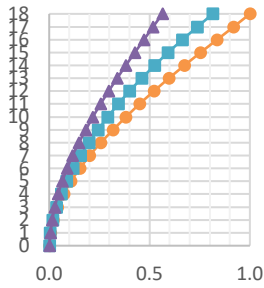


#### F.1.6. Muros de 18 niveles

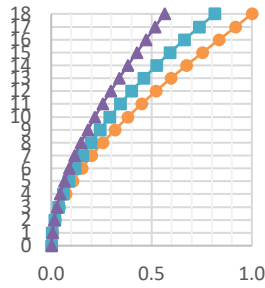
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



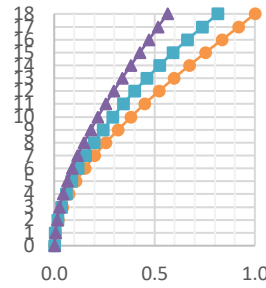
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>

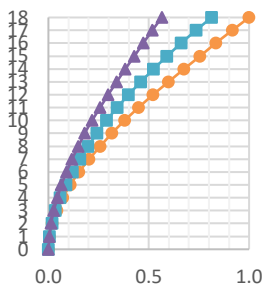


Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>

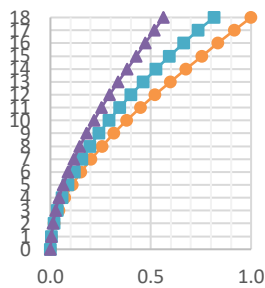


Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

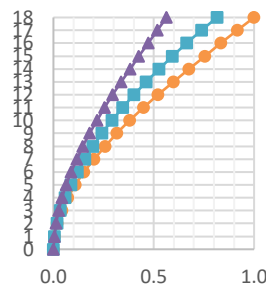
Sin Losa



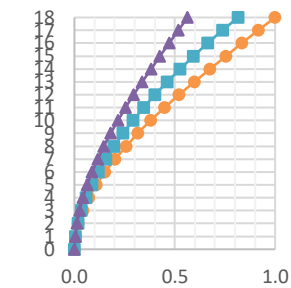
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>



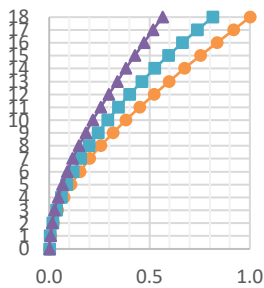
Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



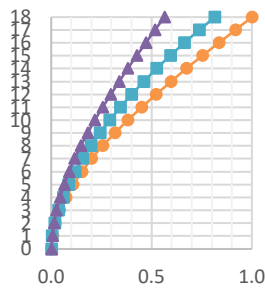
Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>



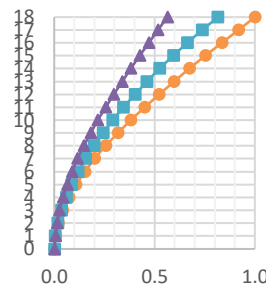
Losa 200 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 250 ton/cm<sup>2</sup>

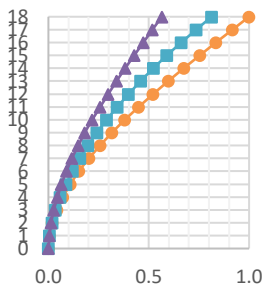


Losa 300 ton/cm<sup>2</sup>

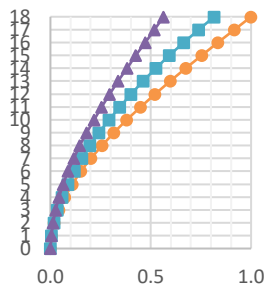


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

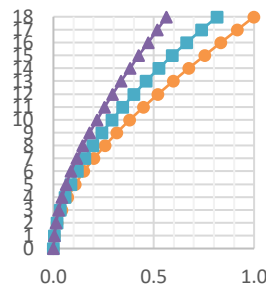
Sin Losa



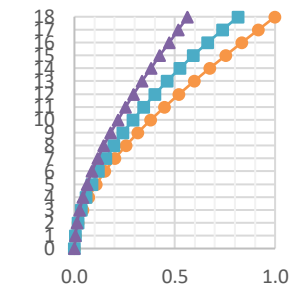
Losa 84 ton/cm<sup>2</sup>

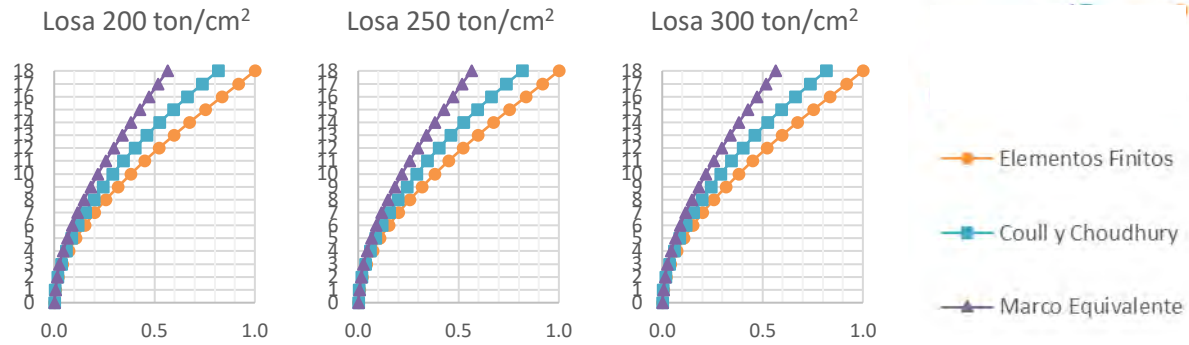


Losa 100 ton/cm<sup>2</sup>



Losa 150 ton/cm<sup>2</sup>

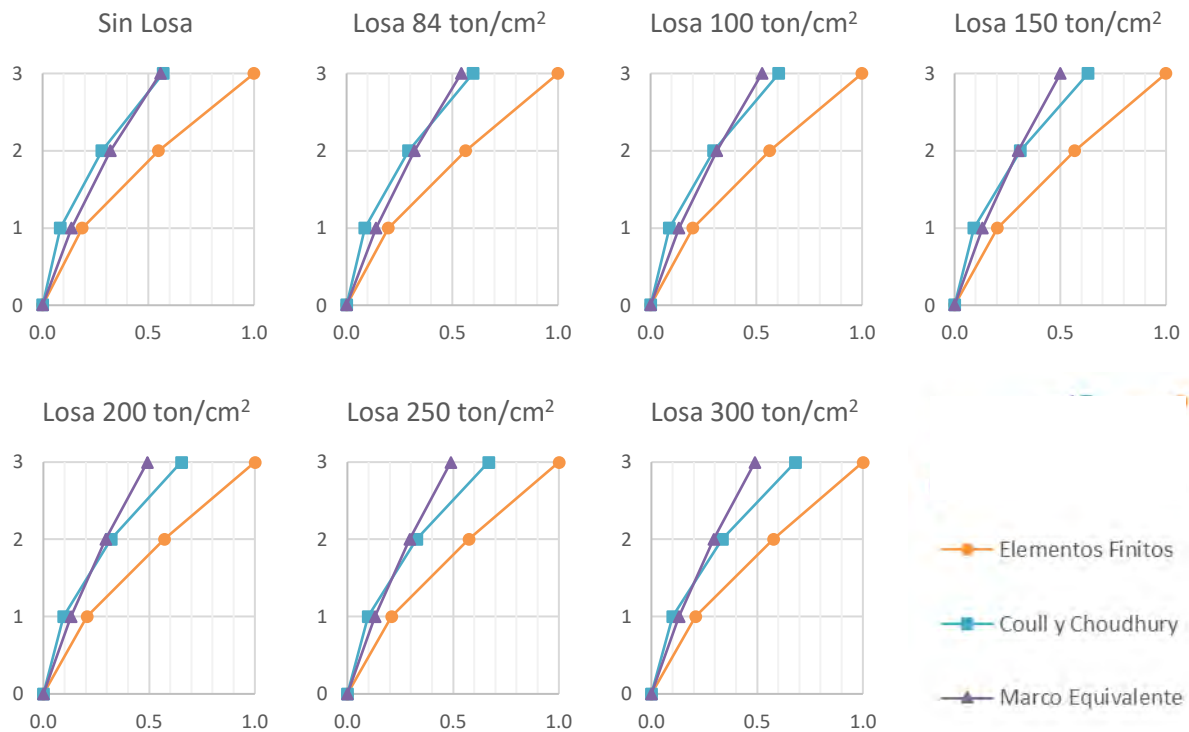




## F.2. Asimétricos RM3

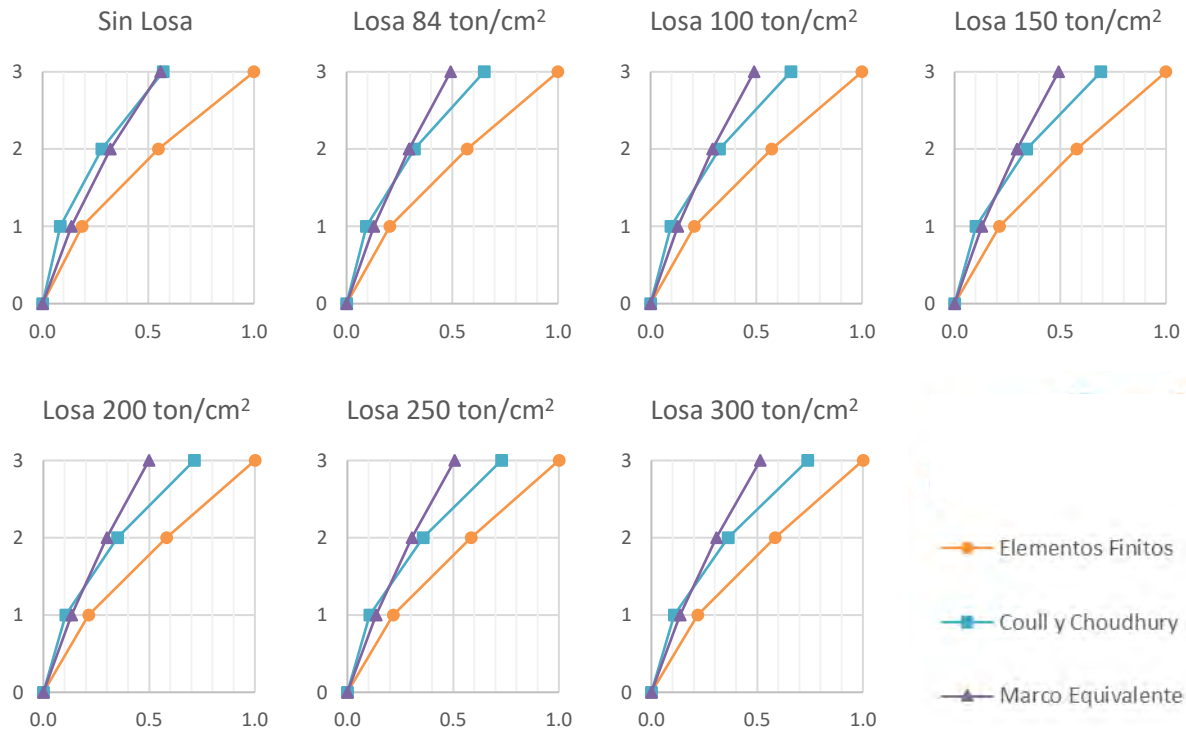
### F.2.1. Muros de tres niveles

Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$

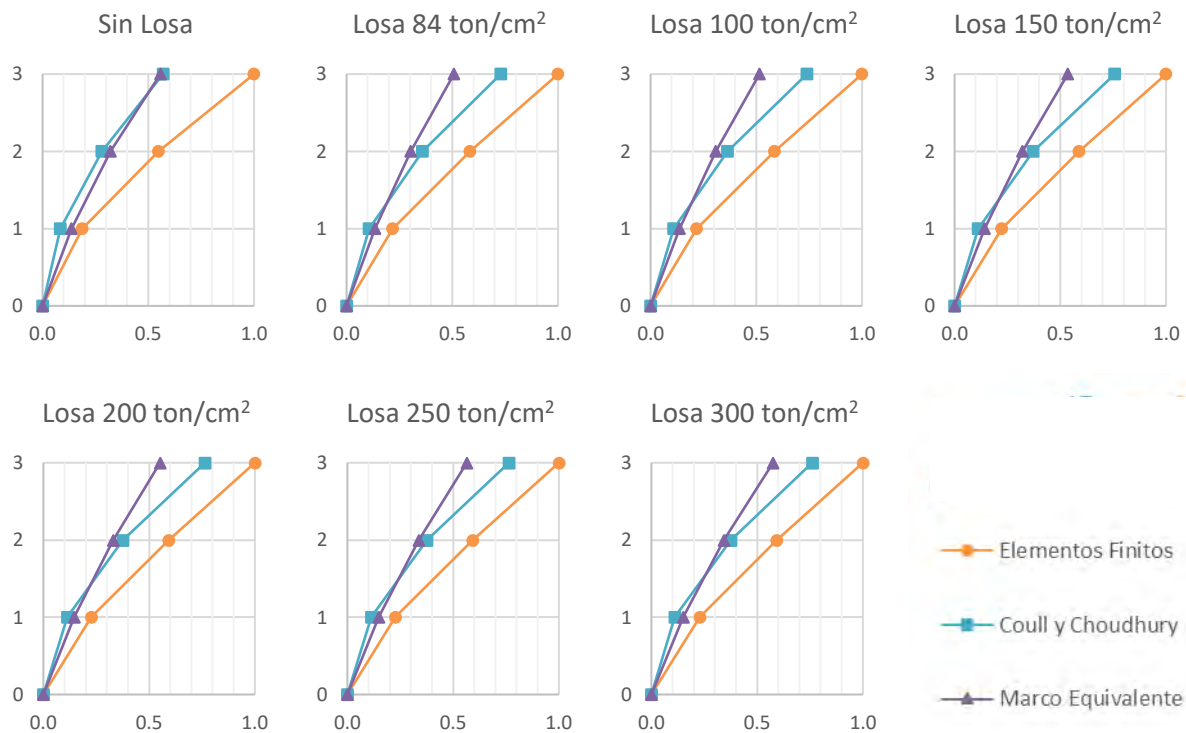




Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

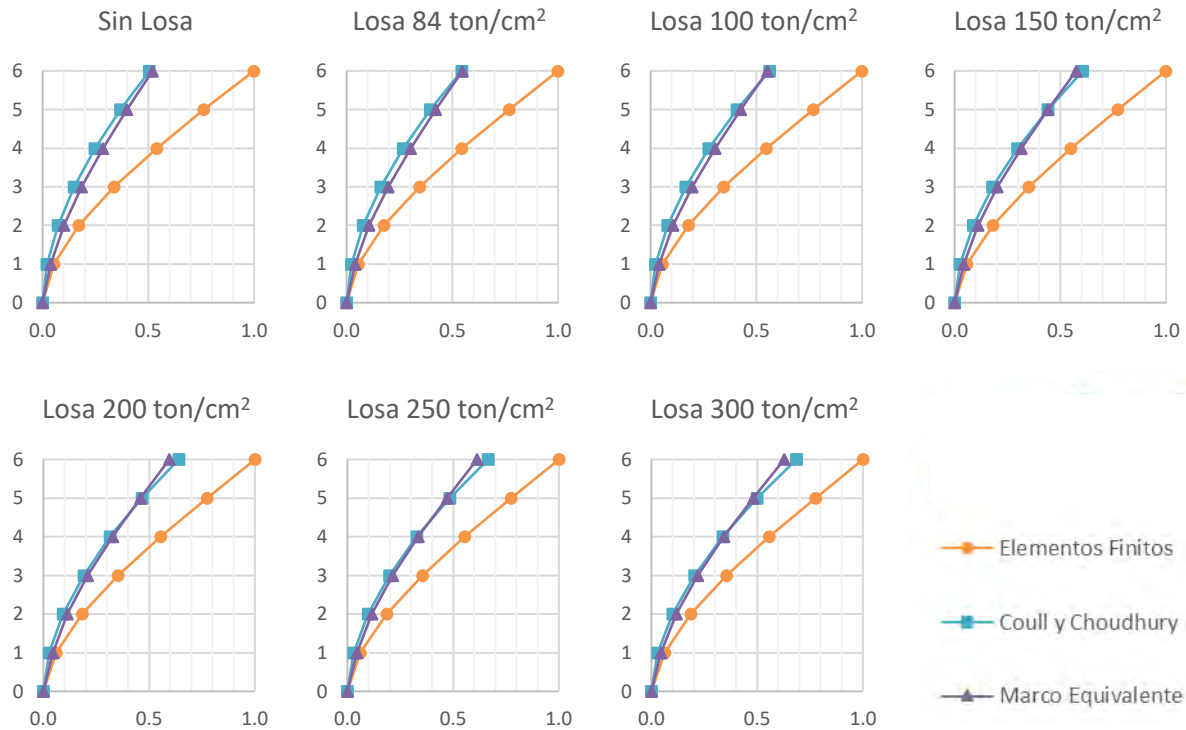


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

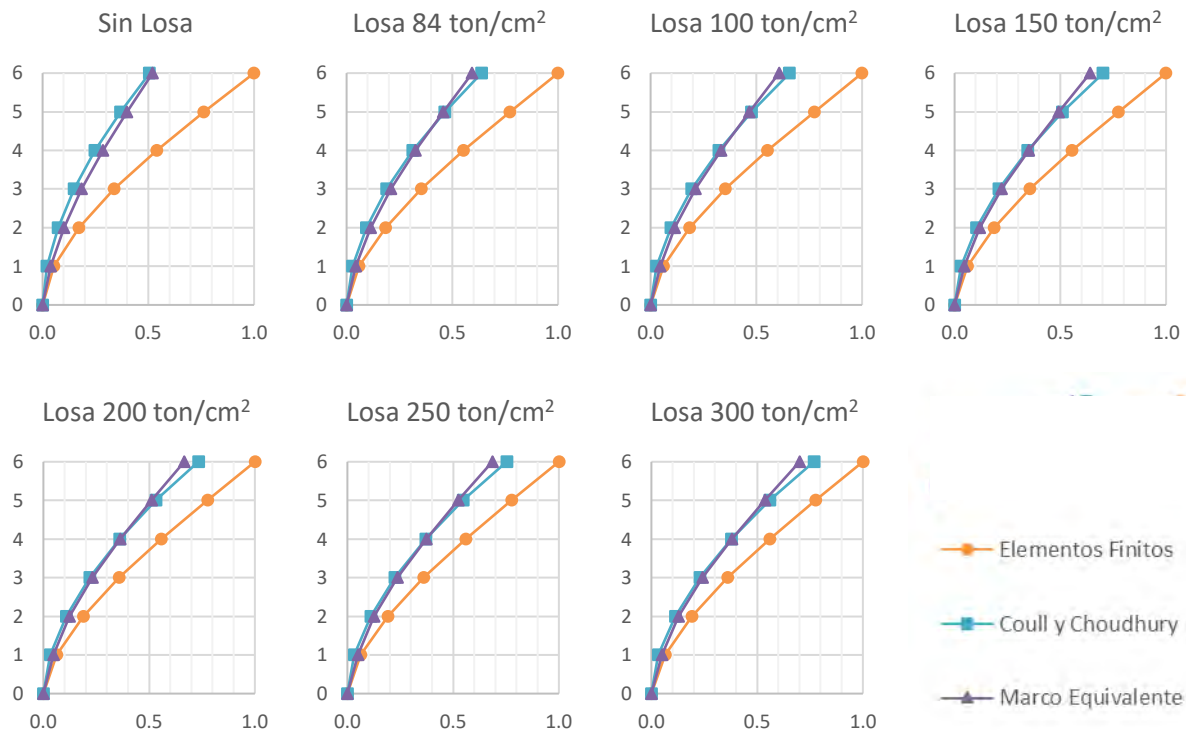


F.2.2. Muros de seis niveles

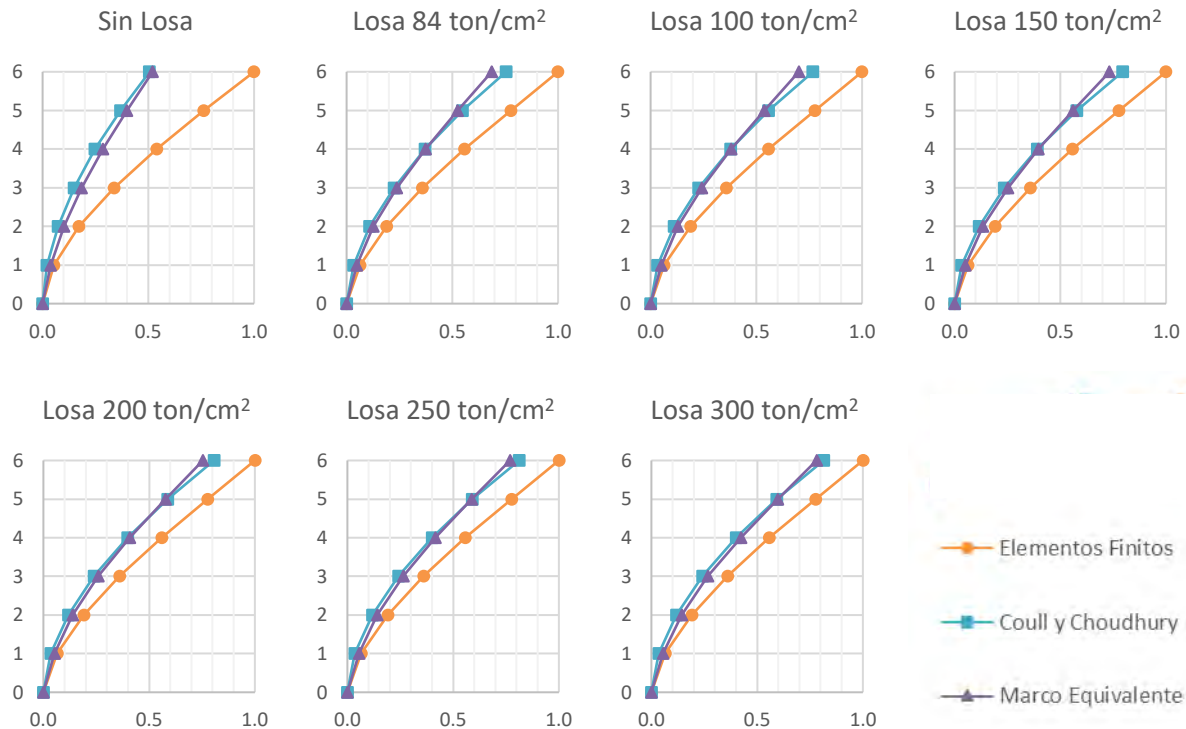
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

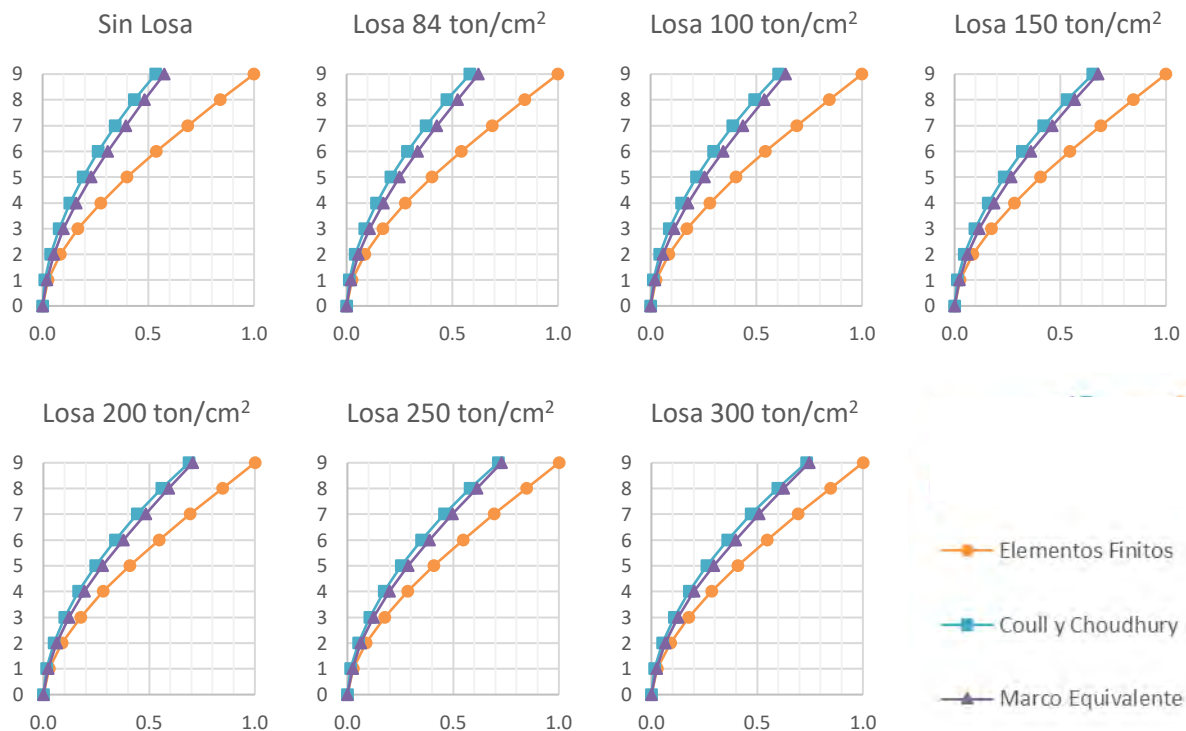


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

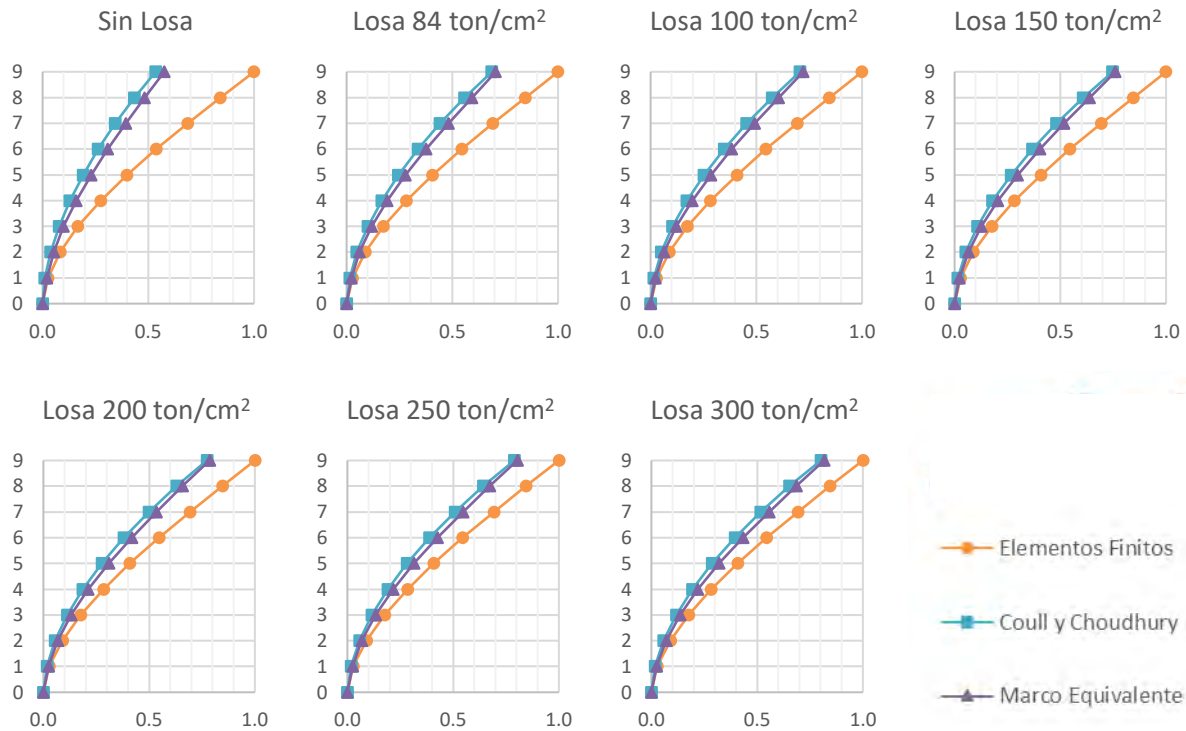


F.2.3. Muros de nueve niveles

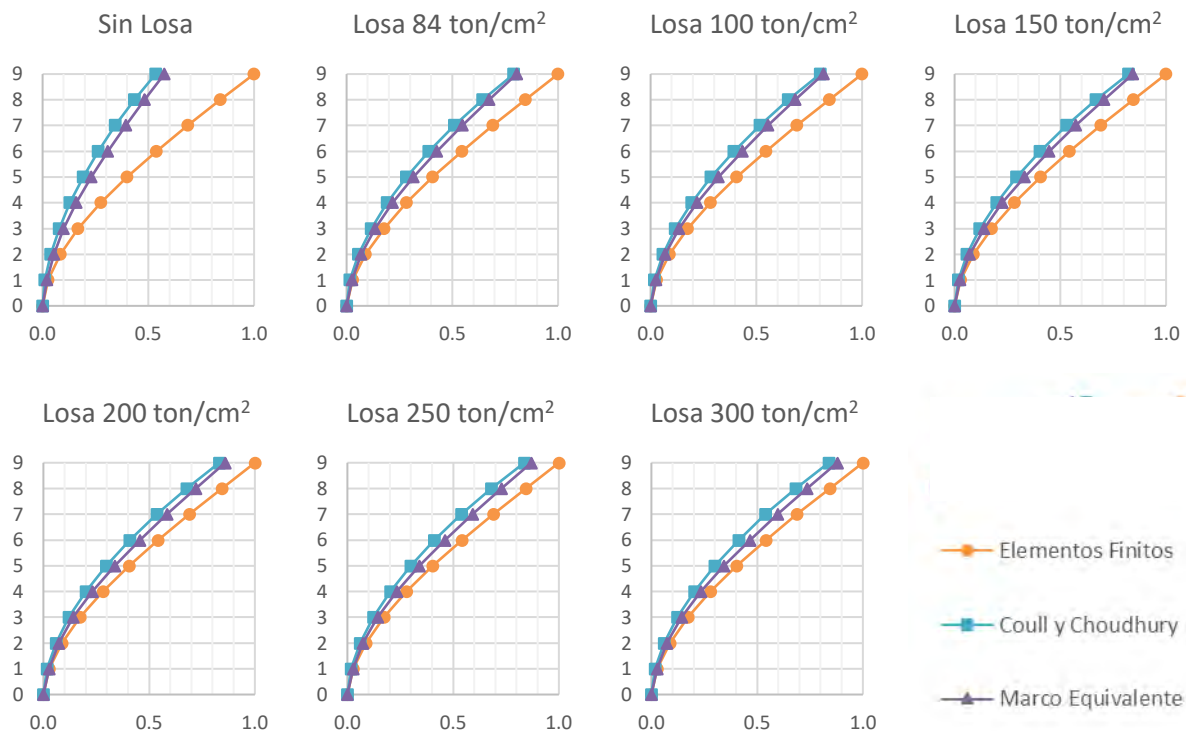
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

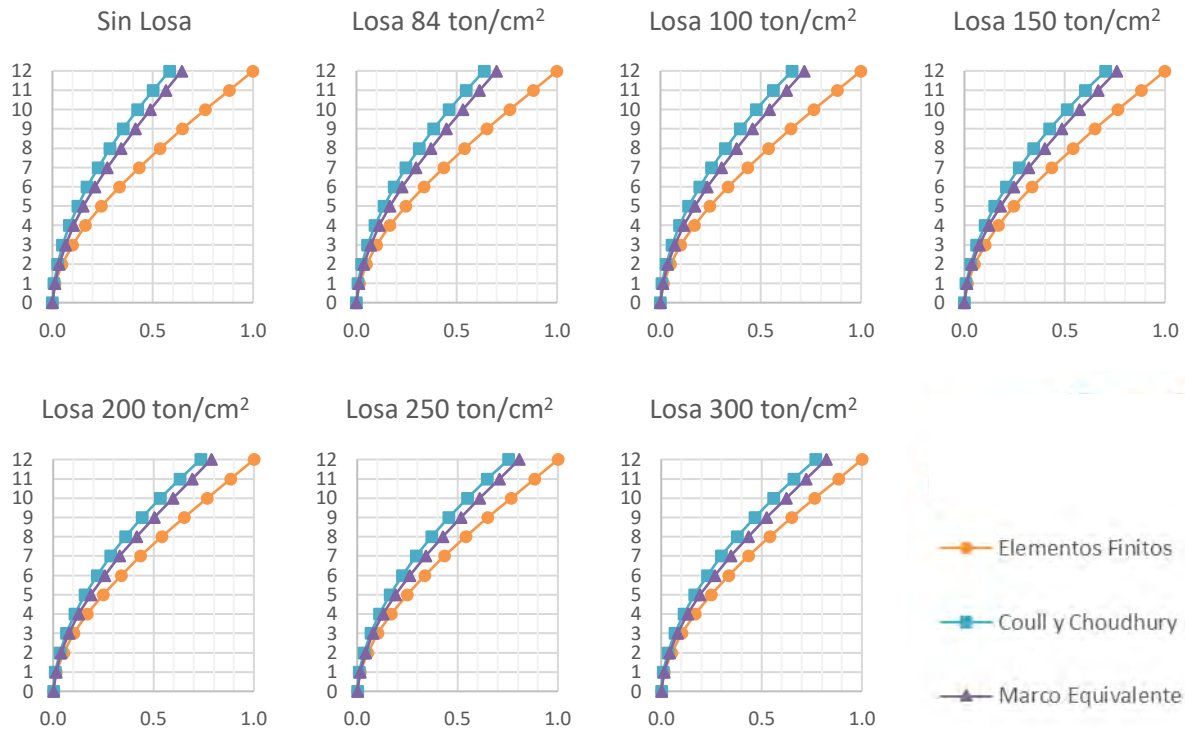


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

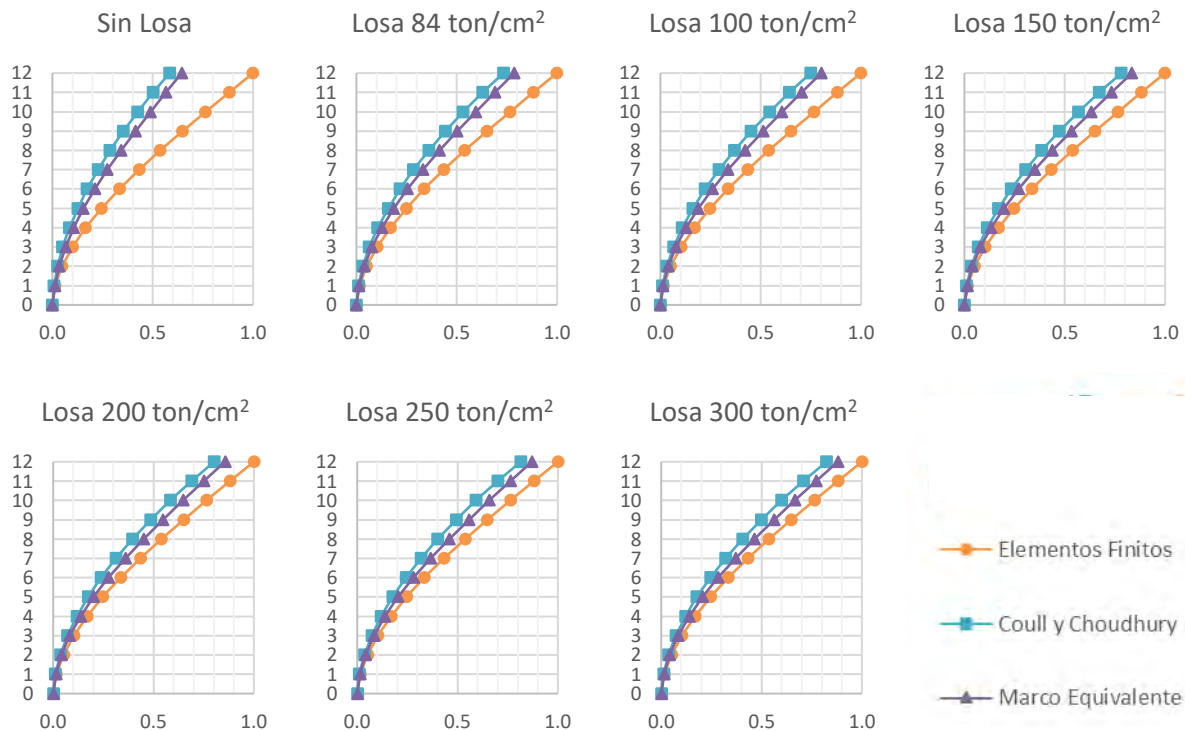


F.2.4. Muros de 12 niveles

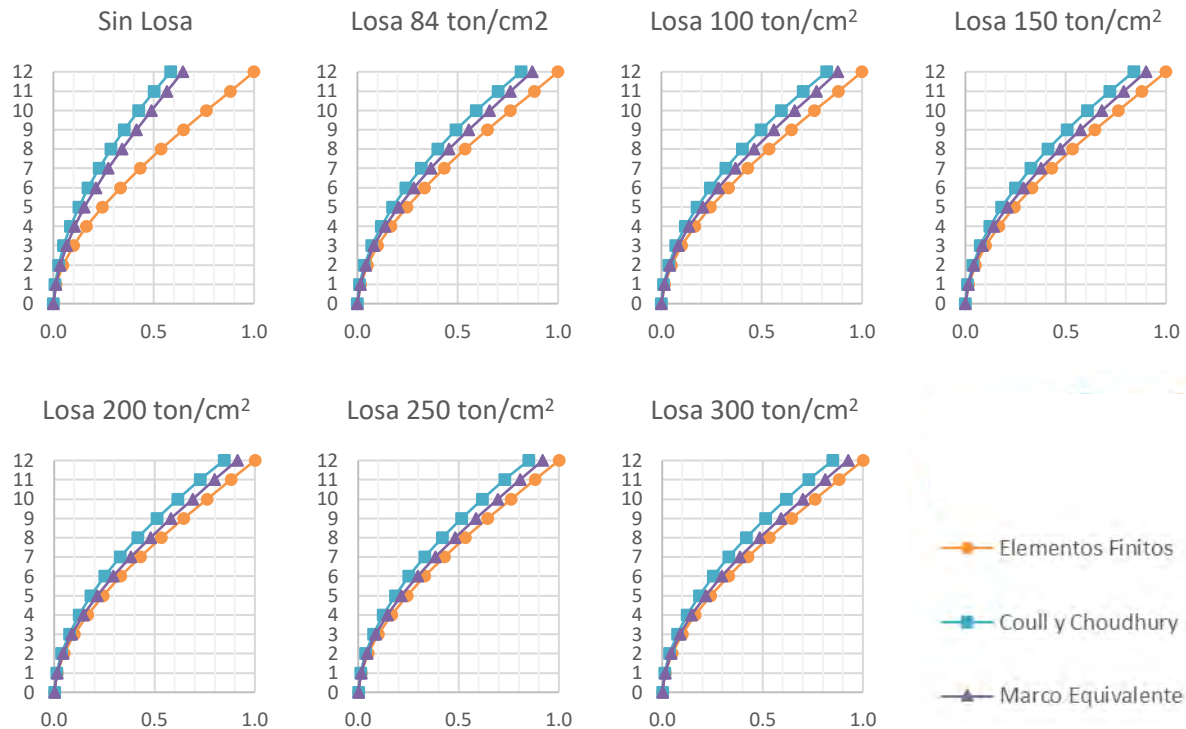
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

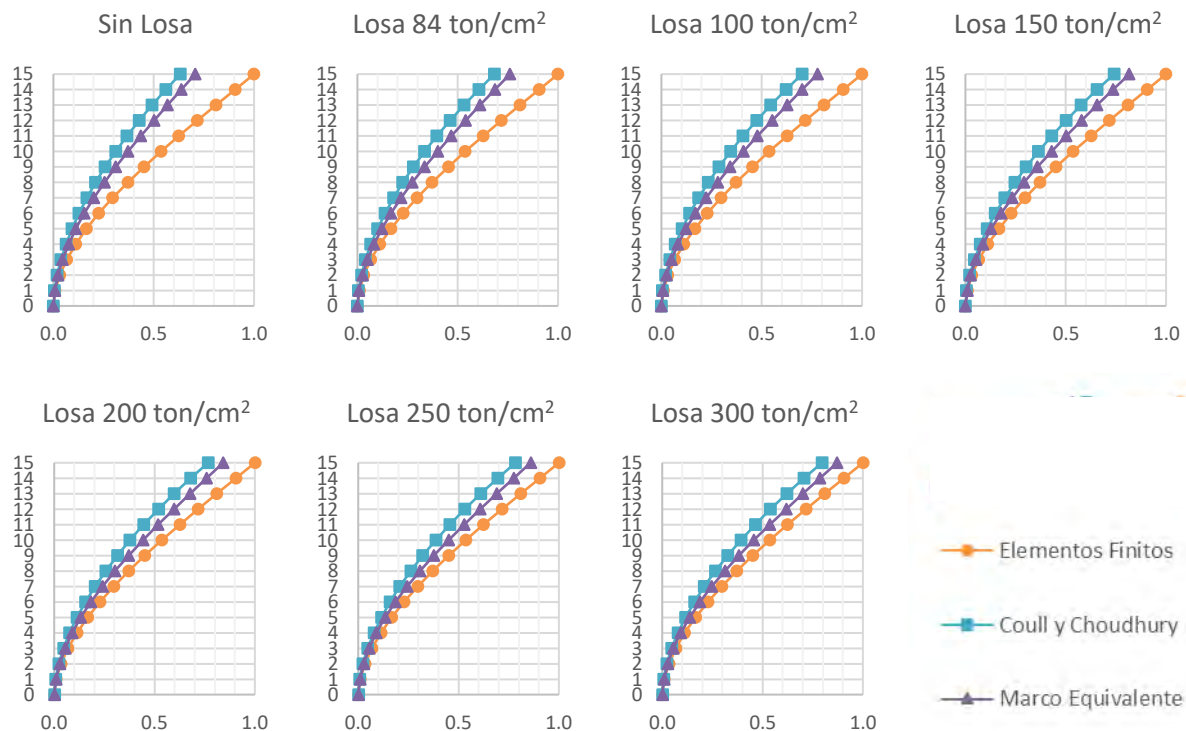


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

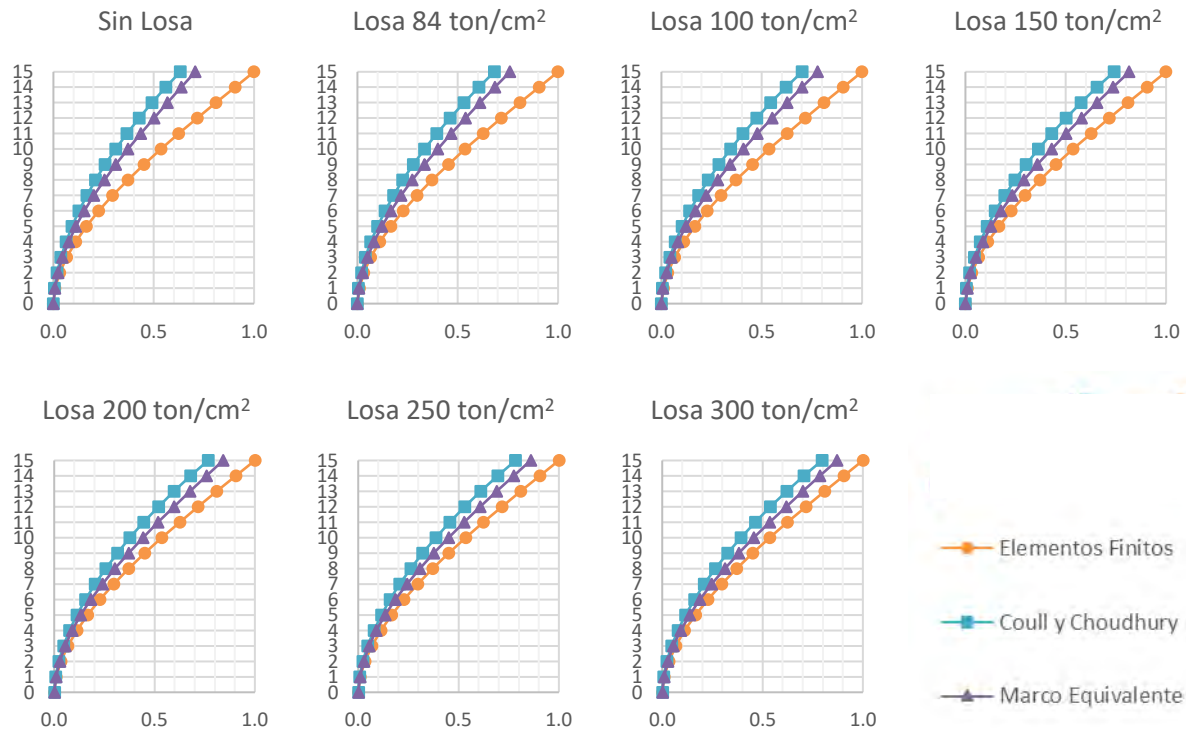


F.2.5. Muros de 15 niveles

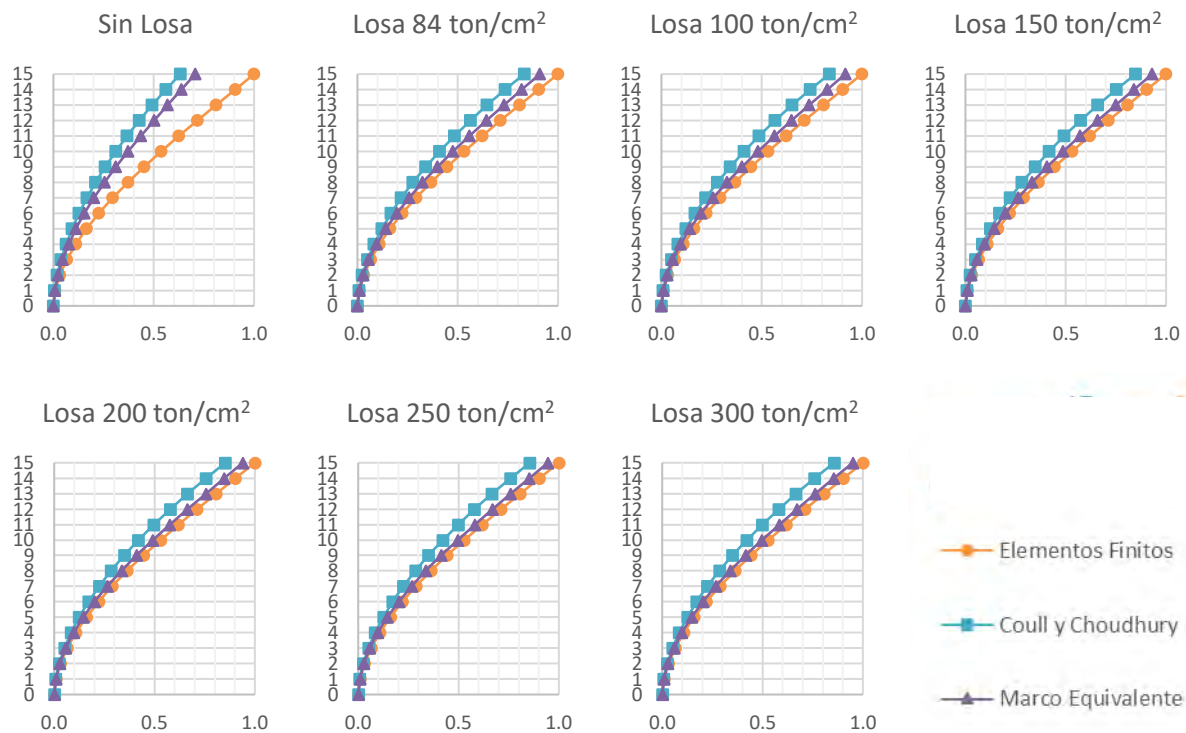
Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$

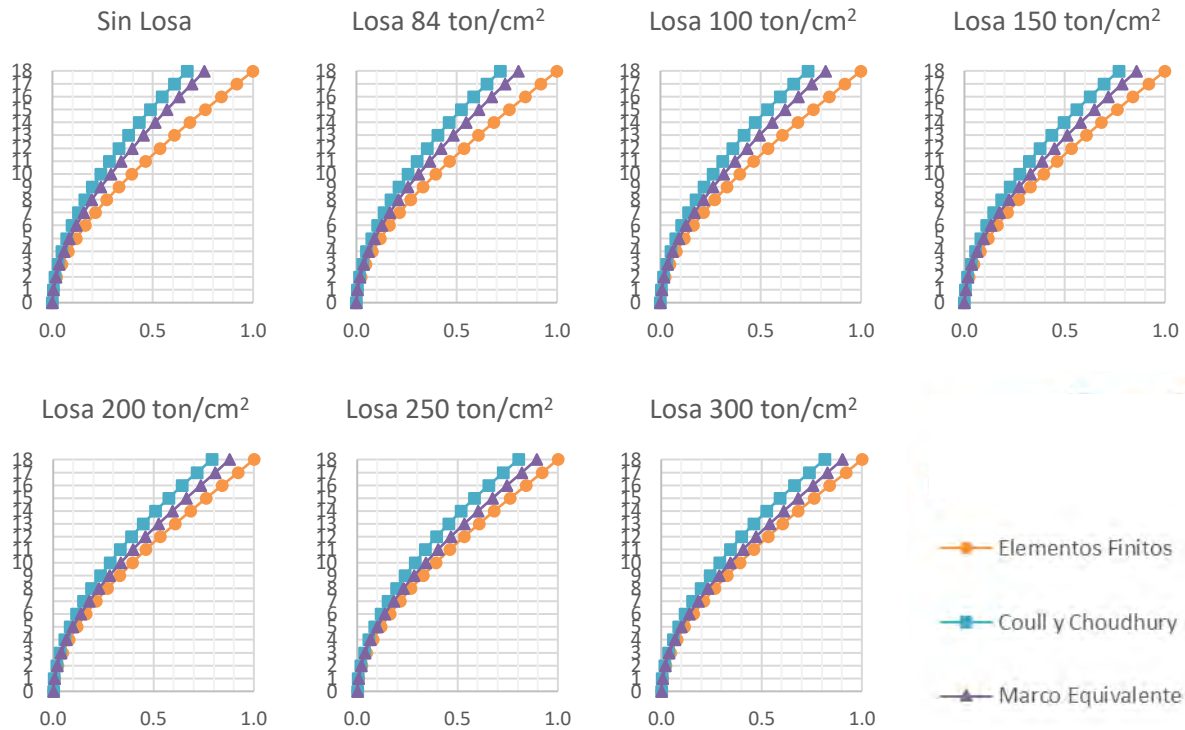


Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

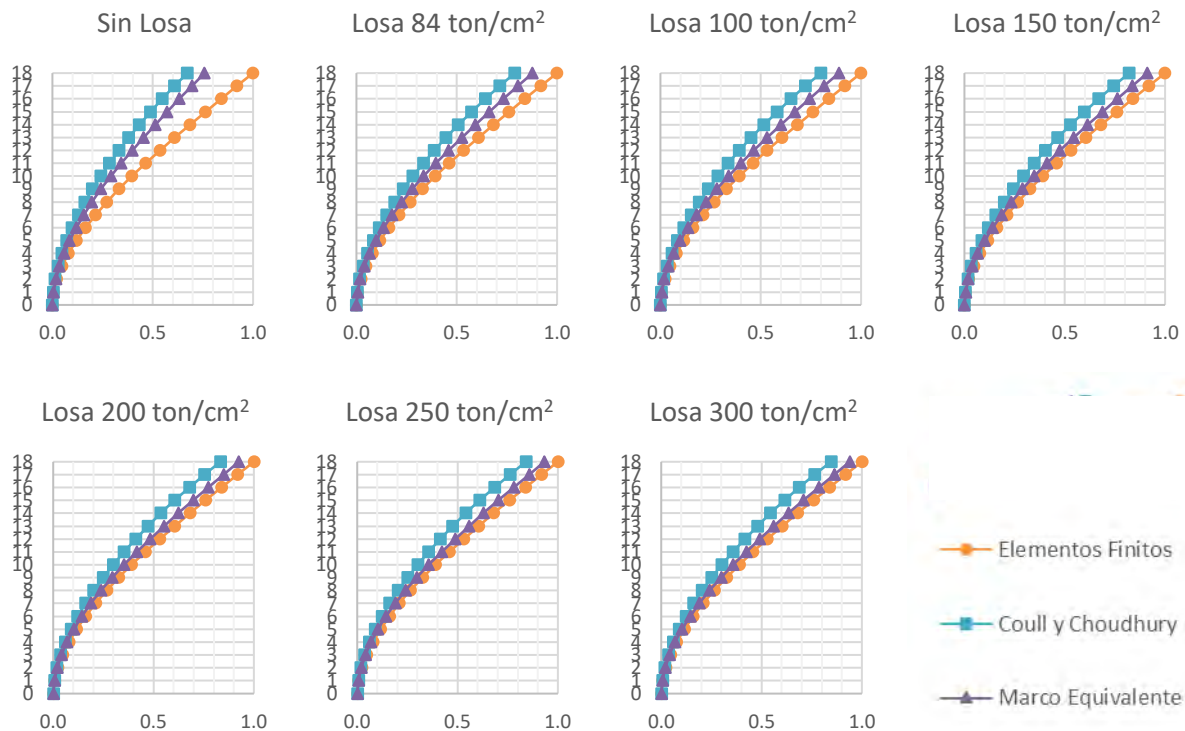


F.2.6. Muros de 18 niveles

Mampostería con  $E = 84 \text{ ton/cm}^2$



Mampostería con  $E = 36 \text{ ton/cm}^2$





Mampostería con  $E = 12 \text{ ton/cm}^2$

